



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Kernphysik

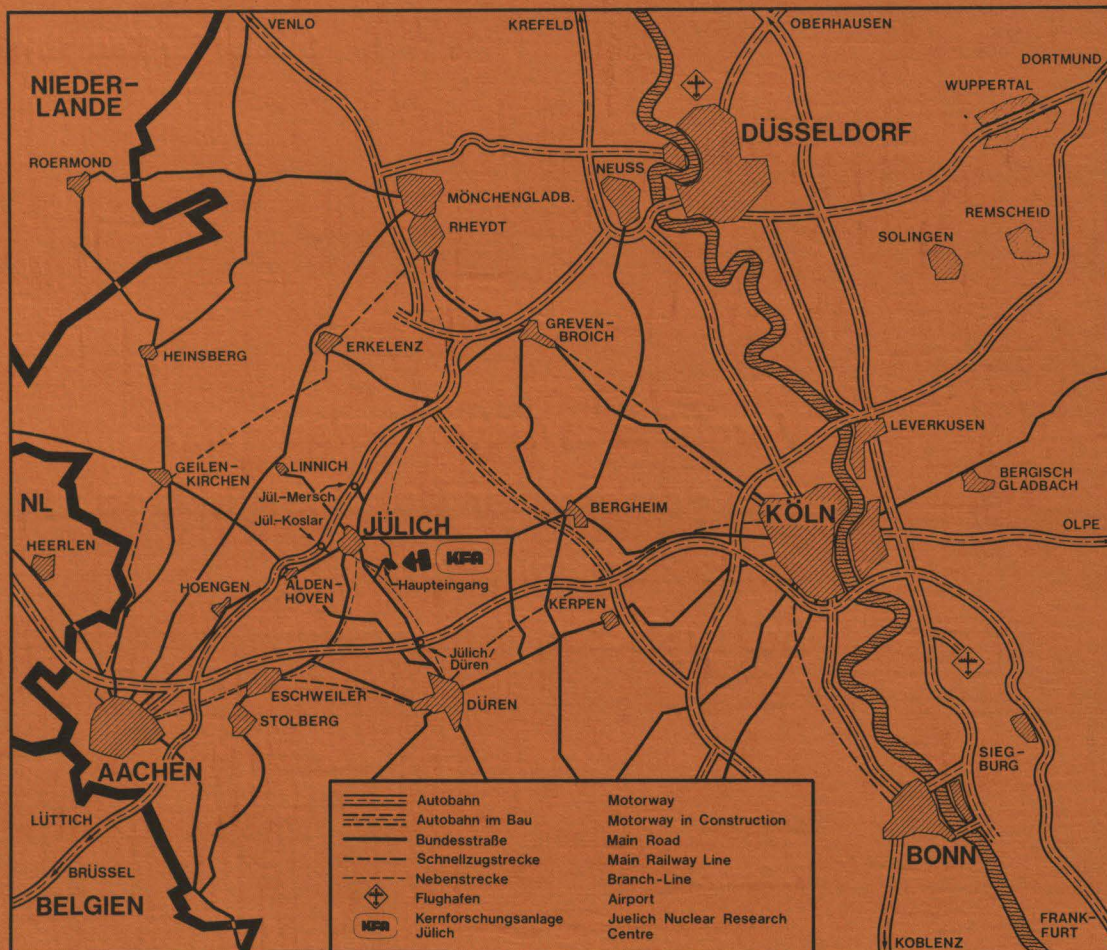
**Vergleich zwischen berechneter
und gemessener Nutzenergieabgabe
eines Flachkollektors
bei typischen Witterungen**

von

R. Posorski

**Jül - Spez - 89
September 1980**

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 89

Institut für Kernphysik Jül - Spez - 89

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 • D-5170 Jülich 1 (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: (02461) 61-0 • Telex: 833556 kfa d

**Vergleich zwischen berechneter
und gemessener Nutzenergieabgabe
eines Flachkollektors
bei typischen Witterungen**

von

R. Posorski

Inhaltsverzeichnis

I Nomenklatur

II Zusammenfassung

III Abstract

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Flachkollektoren	3
2.1 Aufbau und Wirkungsweise des Flachkollektors	3
2.2 Energiebilanz des Flachkollektors	5
3. Versuchsaufbau	9
3.1 Allgemeines	10
3.2 Standort meteorologischer Instrumente	10
3.3 Kollektorkreislauf	10
3.4 Leerlaufkollektor	12
3.5 Gerätebeschreibungen	12
4. Datenweg	17
5. Versuchsdurchführung	18
6. Auswertung	19
6.1 Allgemeines	19
6.1.1 Fehlerbetrachtungen	19
6.2 Bestimmung des n_0 -Punktes	21
6.2.1 Bestimmung des n_0 -Punktes bei konstanter Einstrahlung	22
6.2.2 Bestimmung des n_0 -Punktes bei fluktuierender Einstrahlung	26
6.2.3 Wirkung des Diffusanteils der Globalstrahlung auf den n_0 -Punkt	29
6.2.4 Bestimmung des n_0 -Punktes aus der Leerlauftemperatur	33
6.2.5 Einfluß des Einfallswinkels der direkten Strahlung auf den n_0 -Punkt	35

	<u>Seite</u>
6.2.6 Berechnung der Nutzenergie unter Verwendung der Ergebnisse aus Kap. 6.2 + 6.2.5	36
6.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kap. 6.2	41
6.3 Kollektorverhalten bei erhöhten Vorlauftemperaturen	43
6.3.1 Wirkungsgradbestimmung bei stabilen Wetterlagen und erhöhten Vorlauftemperaturen	43
6.3.2 Vergleich der gemessenen und berechneten Nutzenergie für einen klaren Tag	46
6.3.3 Kollektorverhalten bei wechselnder Einstrahlung mit erhöhten Vorlauftemperaturen	48
6.4 Einfluß von Integrationsdauer und Mittelwertbildung auf die Bestimmung des Wirkungsgrades	54
6.4.1 Vergleich berechneter Nutzenergien unter Verwendung von Stunden- mittelwerten und Tagesmittelwerten	55
6.4.2 Vergleich von Stundenmittelwerten mit Zeitintervallen kürzerer Mittlungsdauer	57
7. Literaturverzeichnis	59
8. Anhang	

I Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Transparente Eintrittsfläche des Kollektors, Apertur	m^2
C_A	Wärmekapazität des Absorbers	$\frac{kJ}{K}$
c_A	Spezifische Wärmekapazität des Absorbers	$\frac{kJ}{kgK}$
C_F	Wärmekapazität des Fluids	$\frac{kJ}{K}$
c_F	Spezifische Wärmekapazität des Fluids	$\frac{kJ}{kgK}$
C_G	Wärmekapazität des gesamten Kollektors	$\frac{kJ}{K}$
c_G	Spezifische Wärmekapazität des gesamten Kollektors	$\frac{kJ}{kgK}$
F'	Absorberwirkungsgrad	-
\dot{G}	Globalstrahlung auf die geneigte Kollektorfläche	$\frac{W}{m^2}$
\dot{G}_{DIF}	Diffusstrahlung auf die geneigte Kollektorfläche	$\frac{W}{m^2}$
\dot{G}_{DIR}	Direktstrahlung auf die geneigte Kollektorfläche	$\frac{W}{m^2}$
$K_{(\theta)}$	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit der Einstrahlung	-
\dot{m}	Massenstrom des Wärmeträgers	kg/s
m_A	Masse des Absorbers	kg
m_G	Masse des Kollektors	kg
\dot{q}	Nutzwärmeleistung des Kollektors bezogen auf die Eintrittsfläche A	$\frac{W}{m^2}$

Symbol	Bedeutung	Einheit
\dot{Q}	Nutzleistung des Kollektors	W
\dot{q}_c	Wärmestrom durch Wärmespeicherung der Absorberbauteile bezogen auf die Apertur A	$\frac{W}{m^2}$
Q_{BSE}	Berechnete Nutzenergie mit einer BSE-Kennlinie	kWh
Q_{MESS}	Gemessene Nutzenergie	kWh
Q_{MOD}	Berechnete Nutzenergie mit einem näher beschriebenen Modell	kWh
\dot{q}_v	Verlust-Wärmeleistung des Kollektors	$\frac{W}{m^2}$
\dot{Q}_v	Verlust-Wärmeleistung des Kollektors	W
t, t_1, t_2	Zeit, Integrationsgrenzen	s, min, h
Δt	Näher bezeichnete Zeitdifferenz	s, min, h
T_a	Austrittstemperatur des Fluids	K
T_e	Eintrittstemperatur des Fluids	K
T_F	Mittlere Temperatur des Fluids	K
T_L	Lufttemperatur der Umgebung	K
T_p	Absorberplattentemperatur	K
ΔT	Näher bezeichnete Temperaturdifferenz	K
U_L	Kollektorwärmedurchgangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 K}$
v_w	Windgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
α	Absorptionskoeffizient der Absorberfläche	-
δ	Diffusanteil der Globalstrahlung	-
η	Wirkungsgrad des Kollektors	-
η_0	Konversionsfaktor	-

Symbol	Bedeutung	Einheit
η_{BSE}	Berechneter Wirkungsgrad mit Hilfe einer BSE-Kennlinie	-
η_{MESS}	Gemessener Wirkungsgrad	-
η_{MOD}	Berechneter Wirkungsgrad mit einem näher beschriebenen Modell	-
θ	Einfallswinkel der Direktstrahlung	Grad
λ	Wellenlänge	μm
τ	Transmissionsvermögen der Deckscheibe	-
$(\tau \alpha)$	Transmissions-Absorbtionsprodukt	-
$(\tau \alpha)_e$	Effektives Transmissions-Absorbtionsprodukt	-

II Zusammenfassung

Es wurden kalorimetrische Messungen zur Bestimmung der Nutzenergie an einem Einscheiben-Flachkollektor mit nicht selektiver Absorberbeschichtung durchgeführt. Gleichzeitig wurden die relevanten meteorologischen Größen registriert. Die Meßwerte liegen als Momentanwerte mit einer Zeitauflösung von 25 s vor.

Das Kollektorverhalten wurde besonders im Hinblick auf transiente Zustände bedingt durch fluktuierende Einstrahlungen untersucht.

Ergebnisse:

In der Nähe des Konversionsfaktors η_0 verhält sich der Kollektor als lineares Übertragungsglied bezüglich der Umwandlung von Strahlung in Nutzleistung. Besondere Einbußen des Wirkungsgrades bei fluktuierender Strahlung treten nicht auf, wenn in die Bilanzierung Reflexionsverluste (Diffusanteil, Winkelkorrektur des $(\tau \alpha)_e$ Produktes der direkten Strahlung) und thermische Verluste mit einbezogen wird.

Das Kollektorverhalten bei Betriebspunkten mit erhöhtem Temperaturniveau läßt sich gut durch das Wirkungsgradkennlinienfeld beschreiben. Die Übereinstimmung wurde sowohl für stabile Strahlungsprofile als auch für fluktuierende Einstrahlungen bestätigt, wenn von Wärmekapazitätseffekten abgesehen wird.

Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Berechnungsmodell zur Bestimmung des Wirkungsgrades aus den meteorologischen Daten, zeigte in allen Bereichen des Kennlinienfeldes gute Übereinstimmungen auf besser als 2% mit den Meßergebnissen.

Modellrechnungen mit der prozedurgemäßen Wirkungsgradkennlinie der BSE-Methode für eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s ergaben Abweichungen vom gemessenen Wirkungsgrad von etwa 6%, was bei niedrigen Wirkungsgraden eine erhebliche Differenz zur gemessenen Nutzenergie verursachte.

Für hiesige Witterungen wäre es sinnvoller, die Kennlinie für eine Windgeschwindigkeit von etwa 3 m/s zur Grundlage der Wirkungsgrad- oder Nutzenergieberechnung zu verwenden, wenn die Windgeschwindigkeit nicht bekannt ist.

Eine feinere Abstufung des Wirkungsgrades bezüglich der Windgeschwindigkeit durch die BSE-Prozedur oder ein geeignetes Verfahren zur Interpolation des Windeinflusses ist für Auslegungsrechnungen notwendig.

Experimentelle Wirkungsgradbestimmungen sind auch bei fluktuierender Einstrahlung möglich, wenn der Streuwirkung der meteorologischen Einflüsse durch eine verlängerte Meßzeit entgegen gewirkt wird deren Minimallänge von den zulässigen Fehlerschranken abhängt. Als Anhaltswert sei hier 30 min - 60 min genannt.

Durch die Zulassung von wechselnder Strahlung und Ergänzung der Instrumentierung könnten die Einsatzmöglichkeiten des BSE-Verfahrens verbessert werden.

III Abstract

Calorimetric measurements were made to determine the useful energy output of an one cover flat-plate collector with non-selective coating. The meteorological data were recorded simultaneously. The data-base consists of instantaneous measurements with a time interval of 25 seconds.

The collector performance was studied with respect to the influence of transient solar radiation.

Results:

In the vicinity of the conversion factor η_0 the collector performs as a linear converter of insolation to sensitive heat.

A significant impact on the efficiency during transient insolation was not observed if reflexion losses (Diffuse fraction, angular modifier of the $(\tau \alpha)_e$ product for direct solar radiation) and thermal losses were taken into account.

The collector performance for transient global radiation at elevated temperature levels agreed well with the efficiency characteristic derived from quasi steady state measurements, if heat capacity effects were not taken into account.

The model used for computing the collector efficiency from the meteorological data showed for all operating conditions an accuracy of $\pm 2\%$ compared with the measured results.

Prediction of all-day collector efficiency by using the efficiency curve based on the BSE-Procedure for an air velocity of $5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ showed deviations of 6% of the measured results, which lead under low efficiency conditions to considerable differences between predicted and measured useful energy output.

For meteorological conditions of the test site and neighbouring regions the accuracy of the estimations could improve by using an efficiency curve for an average air velocity of $3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$, if no other data is available.

For predicting the useful energy output more accurately a higher resolution of the efficiency curves with respect to air velocity is necessary, alternatively a method to model the influence of air velocity is adequate.

Experimental determination of the collector efficiency is possible for fast transients of radiation if time intervals for data acquisition is properly extended.

The results indicate that an integration interval of 30 to 60 minutes is appropriate.

The useability of BSE-test-procedures in the climatic conditions of middle Europe could be largely enhanced, if transient conditions were accepted. This implies additional efforts in equipment and instrumentation.

1. Einleitung und Problemstellung

Techniken zur direkten Nutzung der Sonnenstrahlung hat es schon zu allen Zeiten gegeben.

Selbst der Flachkollektor ist in den wesentlichen Komponenten bereits im 18. Jahrhundert verwirklicht worden. Eine Entwicklung dieser Technik ist aber durch genügend vorhandene und billige Energieträger wie Holz, Kohle, Öl und Gas nicht notwendig gewesen. Erst in den letzten Jahren ist bewußt geworden, daß die fossilen Energieträger in bereits absehbarer Zeit erschöpft sein werden, und außerdem als hochwertige Rohstoffe nutzbringender verwendet werden können.

Die als Alternative bzw. Ergänzung bevorzugte Kernenergie wurde durch das Umweltbewußtsein der Bürger zunehmend kritischer beurteilt. Wir sehen uns heute vor die Aufgabe gestellt, neue Technologien zu entwickeln, die in der Lage sind, möglichst viel des fossilen und nuklearen Energiebedarfs langfristig zu ersetzen oder (durch passive Elemente) einzusparen. Eine der Möglichkeiten bietet die Nutzung der Sonnenstrahlung durch thermische Prozesse.

Der Flachkollektor, der die Sonnenstrahlung bei einem niedrigen Temperaturniveau umsetzt, und dessen Einsatz relativ unkompliziert ist, scheint für mitteleuropäische Wetterverhältnisse sinnvoll einsetzbar.

Am Institut für Kernphysik (IKP) der Kernforschungsanlage Jülich werden seit einigen Jahren die Eigenschaften von Flachkollektoren getestet und die Ergebnisse zur Entwicklung von Testprozeduren bereitgestellt. Neben den Belastbarkeitsgrenzen der Kollektoren ist die zentrale Frage die des Wirkungsgrades. Zusammen mit den meteorologischen Einflußgrößen sind die Kollektordaten maßgebend für die umgesetzte Energie.

Die Prozeduren der Kollektortests schreiben quasistationäre Betriebsverhältnisse bei hohen Bestrahlungsstärken und geringem Diffusanteil vor. Die Vorhersagbarkeit des Kollektorverhaltens und der erzielten Nutzenergie bei diesen stabilen Wetterlagen ist verläßlich. Ob oder wie genau die Aussagen der Kollektortests auf wechselnde Einstrahlungen übertragbar sind, soll in dieser Arbeit untersucht werden. Dazu werden zwei Betriebspunkte untersucht, die sich durch die Temperatur des Fluids unterscheiden.

- a) Fluidtemperatur nahe der Umgebungstemperatur (η_0 -Punkt)
- b) Fluidtemperatur für Brauchwasser ($\approx 50^\circ \text{C}$)

Die Ermittlung der relevanten Daten wird jeweils für Zeitabschnitte von 4 - 8 Stunden vorgenommen, um den Einfluß von Tagesgängen auf das Kollektorverhalten praxisnah zu untersuchen. Durch den Vergleich der gemessenen mit berechneten Nutzenergien für die Meßzeiten sollen Aussagen über Verwendbarkeit der Berechnungsmethoden, aber auch der durch Kollektortests ermittelten Daten gewonnen werden.

Ziel ist es, aus Ergebnissen der Kollektortestprozeduren unter Verwendung von meteorologischen Meßdaten die abgegebene Nutzleistung oder den Wirkungsgrad eines Kollektors zu bestimmen.

2. Flachkollektoren

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Die Abbildung 2.1 zeigt den Schnitt durch einen typischen Flachkollektor. Deutlich sind drei Baukomponenten zu unterscheiden.

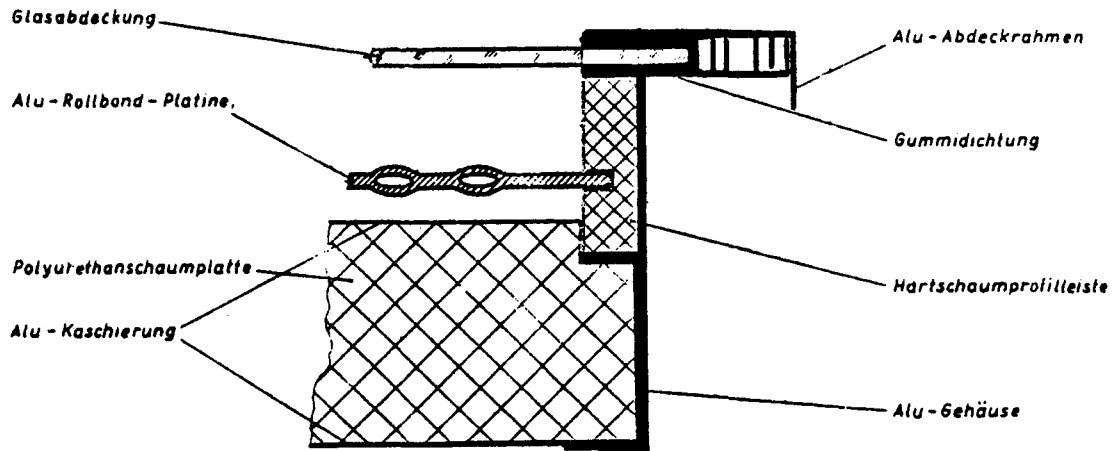


Abb. 2.1: Teilschnitt eines Flachkollektors

a) Absorberplatte

Sie wird von einem Wärmeträgermedium (meist Wasser mit Zusätzen oder Luft) durchströmt, welches die umgewandelte Strahlungsenergie als Temperaturerhöhung des Fluids abführt.

Das Absorbermaterial ist wegen der günstigen Wärmeübertragungseigenschaften häufig Aluminium-, Kupfer- oder Stahlblech.

Die der Sonnenstrahlung zugewandte Fläche ist mit einer hochabsorbierenden Farbschicht bedeckt, deren Absorptionsvermögen bei $\lambda = 0,3 \mu\text{m} \div 3 \mu\text{m}$ zwischen $\alpha = 0,90 \div 0,97$ liegen kann.

Verbindet die Beschichtung die Eigenschaften hoher Absorption für Sonnenstrahlung mit niedriger Emission im langwelligen Infrarotbereich, so handelt es sich um eine selektive Beschichtung, durch die die Strahlungsverluste des Absorbers verringert werden.

b) Transparente Abdeckung

Durch sie fällt Sonnenstrahlung auf die Absorberfläche. Es handelt sich meist um eine ebene Glasscheibe oder ein System aus mehreren parallel angeordneten Glasscheiben.

Die Durchlässigkeit für Sonnenstrahlung soll möglichst groß sein. Sie ist für eine Glasscheibe etwa 90% bei senkrechtem Strahlungseinfall.

Sinn der Abdeckung ist die Verringerung der Verluste. Sie verhindert die direkte konvektive Wärmeabfuhr der Absorberfläche an die Atmosphäre und wirkt außerdem als Strahlungsschild gegen die thermische Strahlung des Absorbers (Treibhauseffekt).

c) Rückwand- und Seitenisolation

Als Wärmedämmmaterial werden Kunststoffschäume, Steinwolle oder Glasfasermatten verwendet, deren typische Wärmeleitfähigkeit bei $3.5 \cdot 10^{-2}$ W/mK liegt. Sie setzen die Wärmeverluste auf der Rückseite und den Kollektorseiten herab. Diese 3 typischen Komponenten findet man in allen Flachkollektoren wieder.

Schließlich sei noch der Rahmen erwähnt, der den Komponenten die Stabilität und die Bauform gibt.

Wird der Einfluß der Absorption der Deckscheibe mit berücksichtigt, so wird das durch den Index e (effektiv) gekennzeichnet

$$\dot{G} (\tau \alpha)_e$$

Der Wärmeübergang zwischen dem Absorbermaterial und dem Fluid, der eine anisotrope Temperaturverteilung verursacht wird durch den Absorberwirkungsgrad F' berücksichtigt.

$$\dot{G} (\tau \alpha)_e F'$$

Der durch die Einstrahlung \dot{G} bewirkte Energiestrom $\dot{G} (\tau \alpha)_e F'$ unterliegt thermischen Verlusten.

- b) Thermische Verluste entstehen aus allen drei Wärmeübertragungsmöglichkeiten Konvektion, Leitung und Strahlung und werden zum Kollektorstromkoeffizienten (Verlustfaktor) U_L zusammengefaßt. Er gibt den Wärmedurchgang zwischen Fluid und Umgebungstemperatur $(T_F - T_L)$ an.

U_L ist von der Betriebs- und Bauweise sowie von meteorologischen Einflüssen abhängig. Die Darstellung von U_L hat sich als kollektorspezifisches Kennlinienfeld in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $(T_F - T_L)$ mit der Windgeschwindigkeit V_W als sinnvoll erwiesen.

In diesem Ansatz wird nicht zwischen der Umgebungstemperatur T_L und der Himmelstemperatur T_{HI} unterschieden. Die Himmelstemperatur ist für den Strahlungsaustausch zwischen der Deckscheibenoberfläche und der Umgebung verantwortlich und liegt unterhalb der Lufttemperatur, da auch Strahlungsaustausch in hohe Atmosphärenschichten stattfindet. Häufig wird zwischen Lufttemperatur und Himmelstemperatur die Zusammenhänge

$$T_{HI} = T_L - 6^\circ \text{ K}$$

oder

$$T_{HI} = 0.0552 T_L^{1.5}$$

angegeben /2/.

Die thermischen Verluste werden in der Bilanzgleichung durch den Ausdruck

$$\dot{q}_V = U_L (T_F - T_L)$$

dargestellt.

c) Nutzleistung

Die Nutzleistung ist die Enthalpieerhöhung des Wärmeträgermediums. Im Fall einer Flüssigkeit

$$\dot{q} = \frac{\dot{m} c_F}{A} (T_a - T_e)$$

d) Wärmespeicherung der Kollektormaterialien

Wird der Kollektor nicht stationär betrieben, sondern beispielsweise aufgeheizt, so speichern die Kollektorbauteile einen Teil der zugeführten Leistung. Diese Leistung steht während des Aufheizvorganges als Nutzleistung nicht zur Verfügung, kann jedoch später bei Absenkung der Fluidtemperatur teilweise wieder rückgewonnen werden. Die effektive Kollektorstückkapazität setzt sich aus den Einzelkapazitäten der Bauteile unter Berücksichtigung deren Temperaturänderungen zusammen. Die Temperaturänderungen sind natürlich nicht gleich derjenigen des Fluids und müssen berechnet oder durch geeignete Verfahren abgeschätzt werden.

Der bei einer Temperaturänderung des Fluids auftretende Energiestrom wird durch den Ausdruck

$$\dot{q}_c = \frac{(m c) G}{A} \frac{d T_F}{d t}$$

beschrieben.

Diese 4 Energieströme bilden als Bilanz die Kollektorgrundgleichung

$$\dot{G} (\tau \alpha)_e F' = \frac{\dot{m} c_F}{A} (T_a - T_e) + U_L (T_F - T_L) + \frac{(mc) G}{A} \frac{d T_F}{d t}$$

Im stationären Fall ist $\frac{(mc) G}{A} \frac{d T_F}{d t} = 0$

und die Grundgleichung vereinfacht sich zu

$$\dot{G} (\tau \alpha)_e F' = \frac{\dot{m} c_F}{A} (T_a - T_e) + U_L (T_F - T_L)$$

Umgestellt führt dieser Ausdruck unmittelbar auf

$$\eta = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e)}{\dot{G} A} = (\tau \alpha)_e F' - \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.3 veranschaulicht. Die dargestellte Kennlinie ist gültig für eine konstante Windgeschwindigkeit V_W und der Einstrahlung \dot{G} .

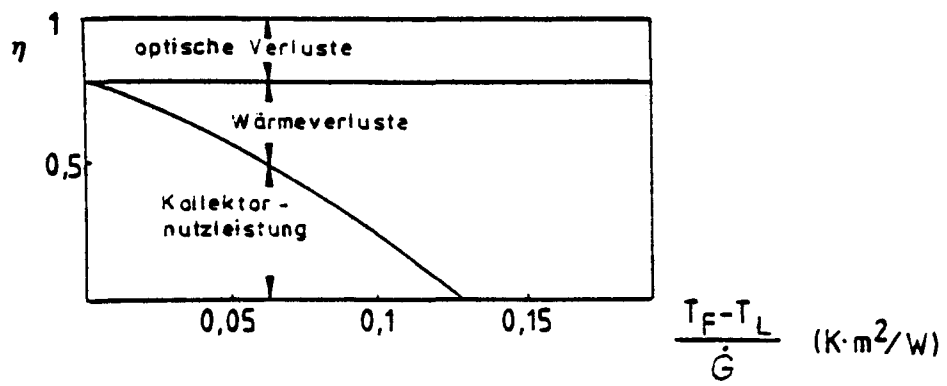


Abb. 2.3: Wirkungsgradkennlinie eines Flachkollektors

3. Beschreibung der Versuchsanordnung

3.1 Allgemeines

Der Versuchsaufbau befindet sich auf dem Gelände des IKP/KFA Jülich.

Geografische Länge: $6^{\circ} 25'$ östliche Länge

Geografische Breite: $50^{\circ} 55'$ nördliche Breite (Bild 1, Anhang)

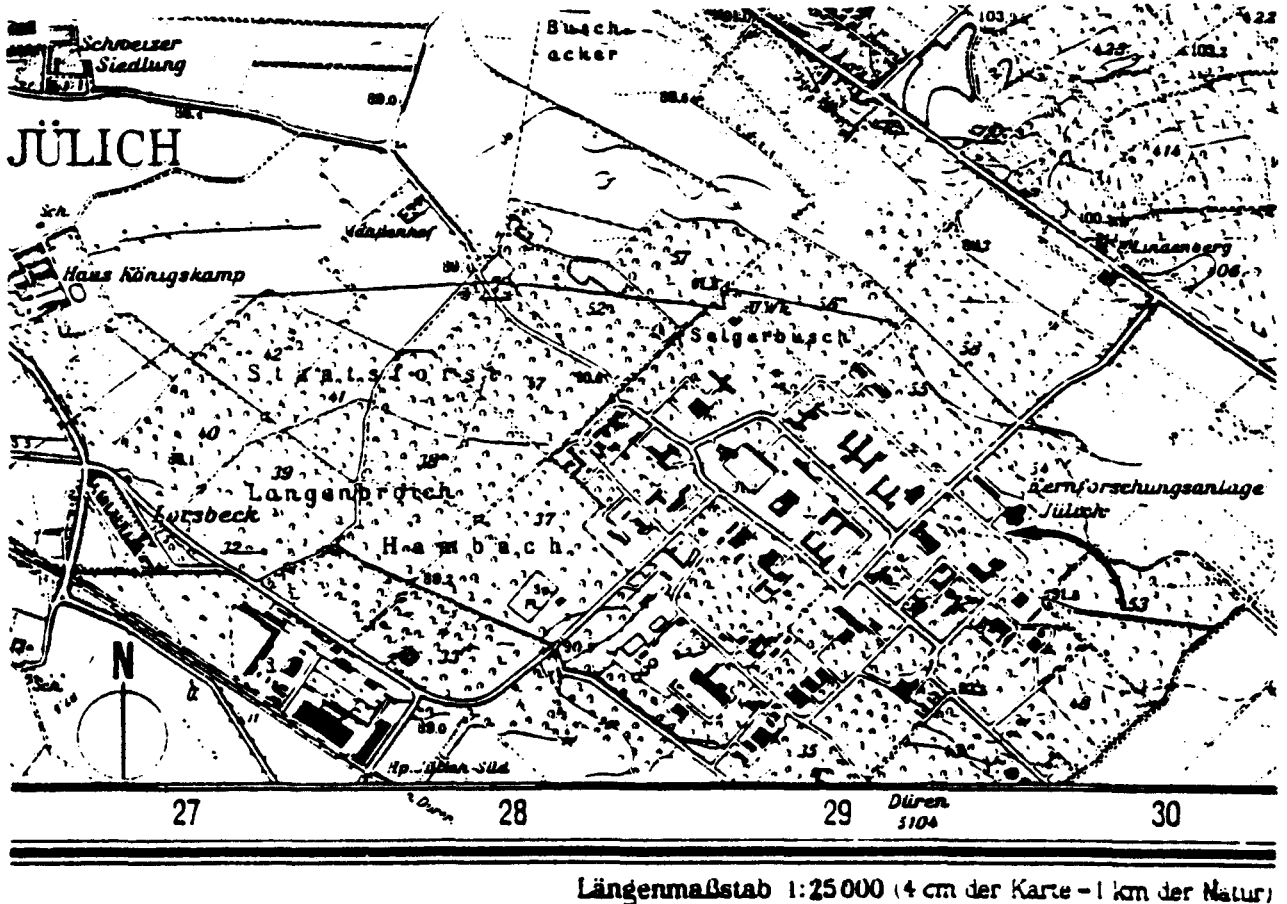


Abb. 3.1: Standort der Versuchsanordnung /15/

Zwei Kollektoren, von denen einer zur ständigen Messung der Leerlauftemperaturen bestimmt ist, und der zweite an einem Flüssigkeitskreislauf angeschlossen ist, sind auf einem freistehenden Metallrahmen befestigt (Bild 2, Anhang).

Die Kollektoren sind nach geografisch Süd ausgerichtet und haben einen Neigungswinkel von 32° gegen die Horizontale.

In unmittelbarer Nachbarschaft neben dem Teststand befindet sich ein Raum, in dem die Meßdaten zentral erfaßt werden (Bild 2 u. 6, Anhang).

3.2 Standort metereologischer Instrumente

a) Globalstrahlung

2 Pyranometer auf dem Rahmen der Kollektorhalterung sind in der Kollektorebene etwa 20 cm oberhalb im gleichen Neigungswinkel angebracht (Bild 2 + 4, Anhang).

b) Diffusstrahlung

1 Pyranometer mit Schattenring befindet sich auf dem Dach des Datenerfassungsraumes. Es besitzt den gleichen Neigungswinkel wie die Kollektoren (Bild 2, Anhang) und dient zur Messung der Diffusstrahlung.

c) Windgeschwindigkeit

Sie wird in einer Höhe von 2.80 m etwa 50 m entfernt vom Teststand gemessen (Bild 3, Anhang)

d) Umgebungstemperatur

Als wichtige metereologische Einflußgröße wird die Umgebungstemperatur auf 2 verschiedene Weisen gemessen:

1) ventiliertes Ausgangsrohr

2) Baumbachhütte

Der Meßort befindet sich freistehend etwa 50 m von den Kollektoren entfernt (Bild 3, Anhang).

3.3 Der Kollektorkreislauf

Aus der im Kapitel 1 beschriebenen Problematik und Aufgabenstellung ergaben sich Forderungen für den Kollektorkreislauf. Er sollte bei konstantem Durchsatz des Wärmeträgermediums für zwei verschiedene Betriebspunkte geschaltet werden können:

a) Versuchsreihen, bei denen die Flüssigkeitseintrittstemperatur in der Nähe der Umgebungstemperatur liegen soll. Dazu wird das Fluid aus einem im Freien aufgestellten 1000 l Kunststofftank entnommen (Bild 4, Anhang).

b) Für Versuchsreihen, bei denen die Flüssigkeitseintrittstemperatur höher als die Umgebungstemperatur liegen soll, wird das Fluid durch einen 30 l Tank geleitet, der gleichzeitig als Vorwärmer dient und die gewählte Vorlauftemperatur erzeugt (Bild 4, Anhang)

Die beiden Kreisläufe sind durch Absperrhähne voneinander getrennt. Der Durchfluß wird mit einer Pumpe und einem regelbaren Durchflußkonstanter eingestellt. An dem am Durchflußkonstanter angeschlossenen Schwebekörperdurch-

flußmesser kann der Volumenstrom des Fluids abgelesen werden (Bild 5, Anhang). Die Temperaturmessungen des Fluids werden unmittelbar an dem Einlaß- bzw. Auslaßstutzen des Kollektors vorgenommen. Dazu wurden Platinthermowiderstände benutzt, die in einer Tauchhülse in den Flüssigkeitsstrom eingebracht sind. Der thermische Kontakt wird durch Kontaktfett verbessert (Bild 4 und 5, Anhang).

Bei einem Teil der Messungen wurde die Deckscheibentemperatur des Absorbers durch ein Infrarot-Strahlungsmeßgerät bestimmt.

Die Zuleitungen vom Vorwärmer, der Durchflußkonstanter, der Schwebekörperdurchflußmesser, die Zuleitungen zum Kollektor und der Kollektorauslaßstutzen bis zur Auslaßtemperaturmeßstelle sind sorgfältig isoliert. Dazu werden Kunststoffschlauchs mit einer Wärmeübergangszahl von $6.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ verwendet (Bild 4 und 5, Anhang).

Wärmeträger des Kreislaufs ist deionisiertes Wasser dem korrosionshemmende Zusätze beigegeben worden sind.

Es handelt sich dabei um folgende Lösung:

0.9 g/l $\text{Na}_2 \text{CrO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$

0.82 g /l $\text{Na}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$

Außerdem wurden Algenvernichtungsmittel zugegeben. Die Erfahrungen mit dieser Mischung sind nach sechsmonatigem Einsatz zufriedenstellend. Es zeigten sich keinerlei Korrosionsschäden.

Der Vorteil dieser Mischung gegenüber handelsüblichen Zusätzen ist das Fehlen der Äthylen-Glycol-Komponente, welche die temperaturabhängigen Eigenschaften des Gemisches in Hinsicht auf Wärmekapazität und Dichte in kaum kontrollierbarer Weise verändert, was Fehler bei kalorimetrischen Messungen begünstigt.

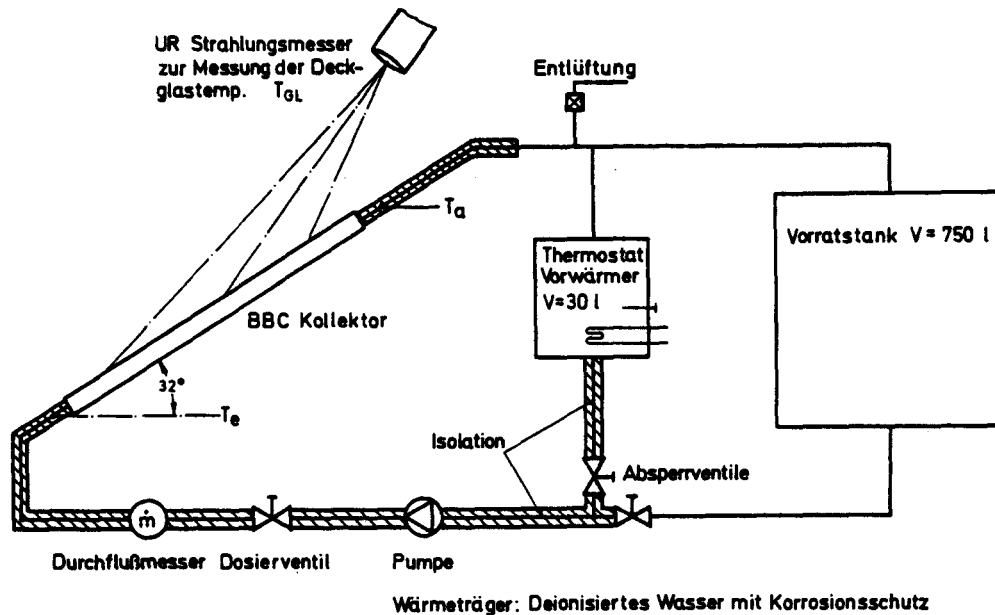


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Kreislaufkomponenten

3.4 Der Leerlaufkollektor

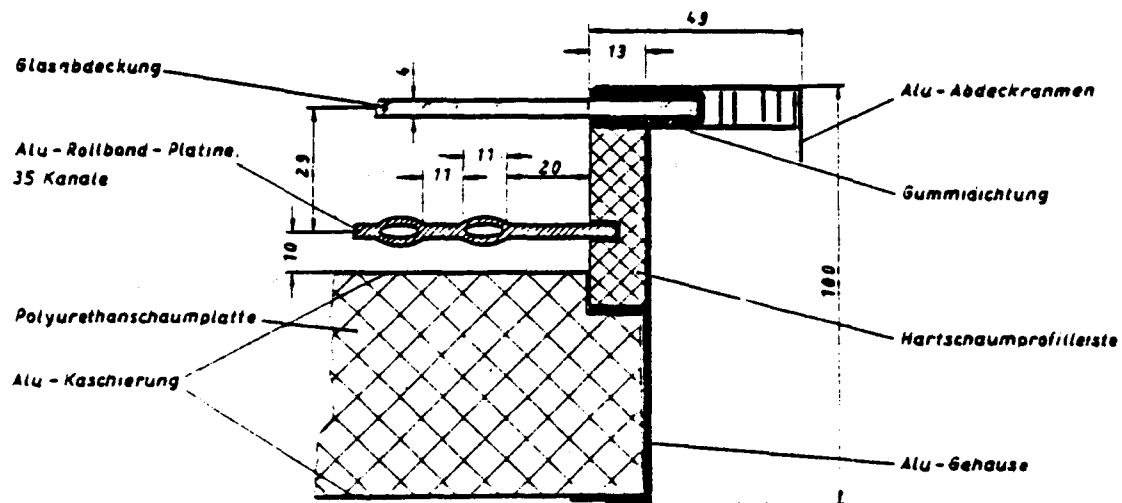
In der gleichen Ebene wie der flüssigkeitsdurchströmte Kollektor ist ein zweiter gleichen Typs aufgestellt. Er dient zur ständigen Erfassung der Leerlauftemperatur (Bild 2, Anhang).

Dazu sind unter der Absorberfläche zwei Platinthermowiderstände angebracht worden. Die Zuleitungen werden durch die Rückwandisolation des Kollektors geführt.

Da dem Leerlaufkollektor keine Nutzenergie entzogen wird, arbeitet er mit dem Wirkungsgrad $\eta = 0$ und wandelt die gesamte zugeführte Strahlungsenergie in thermische Verluste um. Aus seinem Verhalten wird die Gültigkeit des Kennlinienfeldes des Verlustfaktors U_L überprüft.

3.5 Gerätebeschreibungen

Bei den zu testenden Flachkollektoren handelt es sich um Einscheibenflachkollektoren mit nichtselektiver Absorberbeschichtung. Typenbezeichnung BBCSMWSOL 2003. Der Absorber wird von einem unteren Sammelrohr gespeist und in 35 Kanälen durchströmt. Ein oberes Sammelrohr führt das Fluid dem Auslaßstutzen zu. Bild 3.6 zeigt den Kollektor im Schnitt /13/.



BBC SMW Typ SOL 2003

äußere Abmessungen 1494 x 894
transparente Fläche 1,11 m²

Abb. 3.6: Verwendeter Kollektor im Teilschnitt

Einige Daten sind in Tabelle 3.1 aufgeführt

Bauelement	Material	Masse kg	spez. Wärmekap. $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Absorberplatte	AL	4.8	0.896
Deckscheibe	Glas	12.34	0.8
Isoliermaterial	PU-Schaum	2.11	1.34
Rahmen	AL	8.05	0.896
Luft		0.11	1.01
Wasserinhalt		1.24	4.18

Länge: 1.5 m

Breite: 0.9 m

Höhe: 0.11 m

Transparente Fläche 1.11 m²

Brechungsindex Deckscheibe 1.5 (2)

Absorption der Deckscheibe 0.05 cm⁻¹

Durchflußregelung:

Eine elektrisch angetriebene Pumpe speist den Durchflußkonstanter. Für die auftretenden Betriebspunkte ist die Konstanz des Durchflusses laut Kennlinie des Herstellers < 1% vom eingestellten Sollwert, bei konstanter Temperatur.

Der Schwebekörperdurchflußmesser ist am Durchflußkonstanter angebracht.

Meßbereich 16 l/h + 140 l/h

Skalenteilung 2 l/h

Elektromotor, Pumpe, Durchflußkonstanter und Schwebekörperdurchflußmesser bilden eine bauliche Einheit und sind mit Wärmedämmung auf Bild 5, Anhang, zu sehen.

Die Anzeige des Durchflußmessers wurde für die beiden Betriebspunkte des Kollektors auf Temperaturabhängigkeit untersucht. Die Abweichungen vom Meßwert bei $\dot{V} = 12 \text{ l/h}$ waren:

$$T_e = 21^\circ \text{ C} \quad \Delta \dot{V} = - 1.0 \text{ l/h}$$

$$T_e = 48^\circ \text{ C} \quad \Delta \dot{V} = + 2.6 \text{ l/h}$$

Temperaturmessung:

Die Temperaturmessung wurde mit Platinthermowiderständen der Firma Camical durchgeführt. Die Meßgenauigkeit liegt im Betriebsbereich bis 100° C nach Angaben des Herstellers zwischen $\pm 0.15 \text{ K}$ und $\pm 0.3 \text{ K}$.

Bei einer Kalibrierung der verwendeten Thermowiderstände in einem Eis-Wassergemisch wurden Abweichungen des Widerstandspaares für die Ein- und Ausflußtemperatur des Kollektorkreislaufes über eine 30 min Meßzeit bestimmt. Dabei wiesen die Thermowiderstände eine mittlere Abweichung von $+ 0.08 \text{ K}$ vom Schmelzpunkt des Eises auf und differierten untereinander um $\pm 0.03 \text{ K}$. Damit erfüllen die Widerstände die meßtechnischen Anforderungen der Temperaturdifferenzmessung von $\pm 0.1 \text{ K}$. Der Fehler wird für die Gesamtfehlerabschätzung zu $\pm 0.1 \text{ K}$ angenommen.

Temperaturmessung der Deckscheibe:

Dazu wurde ein Infrarot-Strahlungsmeßgerät der Firma Heinemann GmbH installiert. Angaben des Herstellers zu dem Gerät:

Spektraler Empfindlichkeitsbereich 8 - 35 μm

Genauigkeit von $- 20^\circ \text{ C}$ bis 40° C $\pm 2^\circ \text{ C}$

von $- 20^\circ \text{ C}$ bis 30° C $\pm 1^\circ \text{ C}$

Das Gerät ist sorgfältig auf die Deckscheibenmitte justiert worden und befindet sich ca. 5 m von ihr entfernt (Bild 2, Anhang).

Globalstrahlung und Diffusstrahlung:

Zur Globalstrahlung werden zwei Eppley Pyranometer Modell PSP verwendet.

Angaben des Herstellers über die Genauigkeiten der Geräte:

Temperaturabhängigkeit	: ± 190 zwischen -20°C und 40°C
Linearität	: $\pm 0.5\%$ zwischen 0 w/m^2 und 2800 w/m^2
Cosinusabhängigkeit	: $\pm 1\%$ zwischen 0° und 70°
Orientierungsabhängigkeit	: keine

Aufgrund von Erfahrungen mit diesem Pyranometer muß mit Fehlern zwischen 2% - 5% des Meßwertes gerechnet werden /2/. Auch die Cosinusabhängigkeit dürfte die Werksangabe überschreiten /11/. Eine weitere Fehlerquelle ist die spektrale Strahlungsverteilung, die nicht mit der Instrumenteneichung übereinstimmen muß.

Die Messung der Diffusstrahlung wurde mit einem Instrument gleichen Typs mit Schattenring durchgeführt. Zur Korrektur des vom Schattenring abgedeckten Teils der einfallenden Diffusstrahlung gibt es mehrere Ansätze /5/ die zu verschiedenen Ergebnissen kommen. Deshalb wurde als Korrektur der Bruchteil des vom Schattenring abgedeckten Raumwinkels verwendet. Für den Schattenring mit $r = 290\text{ mm}$, $b = 50\text{ mm}$ berechnet sich die Abschattung zu 8.62%.

Die Geräte wurden etwa nach der Hälfte der Meßzeit mit einem geeichten Instrument kalibriert. Dabei stellte sich eine Abweichung des ältesten Gerätes (3.5 Jahre) von 6.5% des vom Hersteller angegebenen Eichfaktors heraus, während das neueste Gerät (5 Monate) keine Abweichung aufwies.

Umgebungstemperaturen: (Bild 3, Anhang)

Sie wurden mit zwei verschiedenen Instrumenten gemessen

a) ventiliertes Ausgangsrohr

Genauigkeit: $\pm 0.1\text{ K}$

b) Baumbachhütte

Genauigkeit: $\pm 0.2\text{ K}$

Die Werte korrespondierten immer hervorragend mit Kontrollmessungen.

Windgeschwindigkeit:

Mit einem Anemometer der Firma Thies wurde die Windgeschwindigkeit gemessen.

Meßgenauigkeit $\pm 5\%$ des Meßwertes

Die Windgeschwindigkeit ist ein wesentlicher Parameter bei der Bestimmung der konvektiven Verluste der Kollektoroberseite. Die Verwendung der Windgeschwindigkeit zur Bestimmung thermischer Verluste ist nicht ohne weiteres möglich, da das Strömungsbild um einen Kollektor die effektiv an der Oberfläche vorhandene Luftbewegung verändert.

Die Abschätzung der Abweichungen von der gemessenen Windgeschwindigkeit liegt mangels geeigneter Auswertungsvorschriften oder Versuche im Ermessen des Bearbeiters, der sich zumindest ein Bild der örtlichen Gegebenheiten gemacht haben sollte. Der Meßfehler des Anemometers ist jedenfalls gegenüber der soeben diskutierten Fehlerquelle vernachlässigbar.

4.0 Der Datenweg

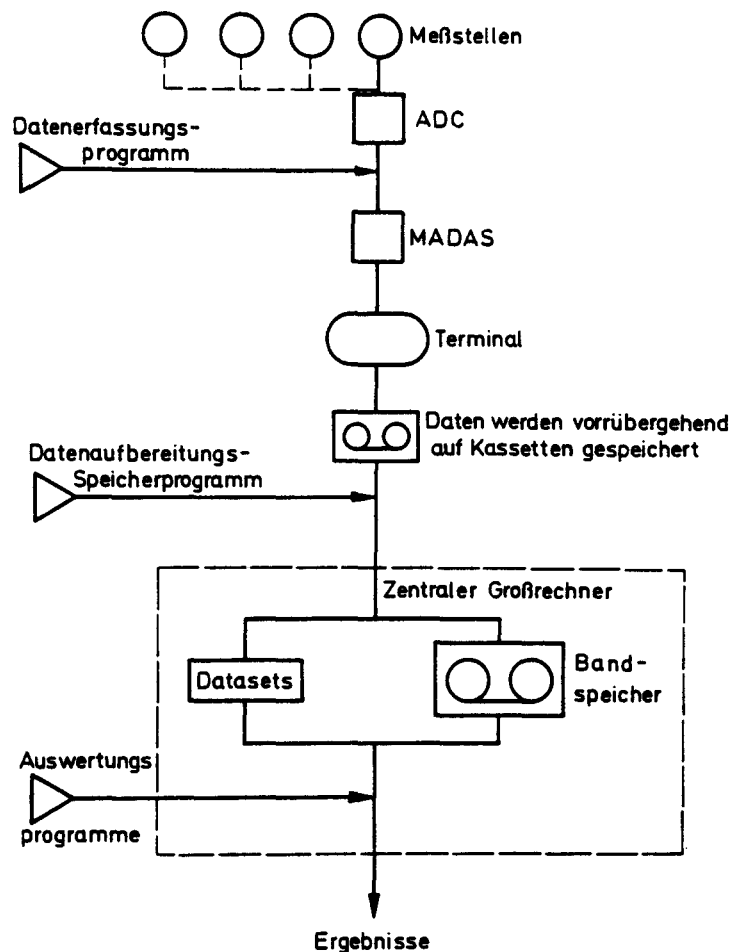


Abb. 4.1: Datenweg

Von den Meßstellen wird ein analoges Signal zum Analog-Digitalwandler (ADC) übertragen. Die Signale werden von MADAS Datenerfassungssystem alle 25 s abgefragt und mittels eines BASIC Programms zur Speicherung aufbereitet. Die Bezugszeit war MEZ. Als physikalische Größen werden sie an ein Bildschirmterminal übergeben. Dort können sie unmittelbar nach dem Meßvorgang kontrolliert und gleichzeitig auf Kassetten gespeichert werden. Später werden diese Daten auf die Bänder des zentralen Großrechners der KFA überspielt und stehen der Auswertung zur Verfügung.

5. Versuchsdurchführung

Nach Fertigstellung des Versuchsaufbaus wurden die Meßgeräte für die kalorimetrischen Messungen auf ihre Meßgenauigkeit und systematische Fehler überprüft bzw. kalibriert. Der Durchfluß \dot{m} wurde durch Wägung und Zeitmessung bestimmt und mit dem Meßwert des Schwebekörperdurchflußmesser verglichen. Es wurde eine Temperaturabhängigkeit für beide Betriebspunkte festgestellt (Kap. 3.5).

Die Platinthermowiderstände zur Messung der Fluideintrittstemperatur T_e und der Fluidaustrittstemperatur T_a wurden auf einen systematischen Fehler und Einhaltung der DIN Toleranz überprüft (Kap. 3.5).

Die drei beteiligten Pyranometer wurden nach der Hälfte der Meßzeit geeicht (Kap. 3.5).

Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit sind durch Kontrollmessungen in regelmäßigen Abständen bestätigt worden.

Die Datenerfassung erfolgte im Hinblick auf die Aufgabenstellung unter dem Gesichtspunkt zusammenhängender Meßperioden von Wetterlagen, auf die die Klassifizierung "wolkenlos", "fluktuierende Einstrahlung" oder "bedeckt" zutrifft.

Das verwendete Datenerfassungssystem MADAS ermöglicht die Registrierung digitaler Daten, die gut dazu geeignet sind von Rechenanlagen bearbeitet zu werden. Die Zuverlässigkeit des Systems wurde entscheidend verbessert durch den Einbau einer Schutzschaltung gegen Überspannungen. Zuvor kam es zu häufigen Ausfällen und damit zu Datenverlusten.

Die Registrierung der Durchflußdaten ist mangels eines geeigneten Gerätes nicht an das Datenerfassungssystem angeschlossen. Der Durchfluß wurde während des Meßvorganges mehrfach abgelesen und bei Abweichungen vom Sollwert nachgeregelt.

Die typischen Abweichungen lagen bei $\pm 1.4\%$.

Die Abdeckscheibe des Kollektors ist wegen starker Verschmutzung während der Dauer der Messungen zweimal gesäubert worden. Die Hauben der Pyranometer wurden regelmäßig zu Beginn der Messungen auf Tau und Verschmutzung kontrolliert. Zu bestimmten Sonnenständen traten erhebliche Strahlungsreflexionen an benachbarten Objekten auf. Laufende Messungen wurden dann abgebrochen oder die Daten bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

6. Auswertung

6.1 Allgemeines

Die Meßdaten standen zu Beginn der Auswertung auf einem Bandspeicher des zentralen Großrechners der KFA.

Die Daten der verschiedenen Meßgrößen wurden durch ein Plotprogramm zu zeitabhängigen Kurven verarbeitet. Alle Programme sind in FORTRAN geschrieben und speziell für diese Auswertung erstellt worden.

Der Leser sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß aus Gründen der Darstellbarkeit bei vielen Diagrammen der 0-Punkt unterdrückt werden mußte.

6.1.1 Fehlerbetrachtungen

Die Bestimmung des Wirkungsgrades ist von 3 Meßgrößen abhängig.

- a) Durchflußmessung \dot{m}
- b) Temperaturmessung ($T_a - T_e$)
in diesem Kapitel kurz mit ΔT bezeichnet
- c) Strahlungsmessung \dot{G}

Das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz ordnet der Größe

$$P = h(x, y, z)$$

mit den Meßgrößen x, y, z und den Stichprobenumfängen n, m, l einen mittleren Fehler zu:

$$S = \pm \sqrt{\frac{1}{nml-1} \left((n-1) ml \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 S_x^2 + (m-1) nl \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 S_y^2 + (l-1) mn \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 S_z^2 \right)}$$

mit

$$\begin{aligned} S_x &= \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\bar{x} - x_i)^2} \\ S_y &= \pm \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum (\bar{y} - y_i)^2} \\ S_z &= \pm \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum (\bar{z} - z_i)^2} \end{aligned}$$

In diese Gleichung werden zur Fehlerabschätzung typische Werte eingesetzt.

Der relative Fehler der Strahlungsmessung wird mit $\pm 3\%$ beziffert. Fehler der Temperaturmessung durch Platinwiderstände betragen ± 0.1 K. Die Abweichungen des Durchflußmessers betrugen $\pm 1 \frac{1}{h}$ (siehe Kap. 5). Für Durchflußwerte nahe des Normdurchsatzes von $72 \frac{1}{h}$ ergibt sich ein relativer Fehler von 1.4%. Die Anzahl der Meßwerte (Stichprobenumfang) wird für einen Stundenwert angesetzt.

Strahlungsmessung $\dot{G} \rightarrow l \geq 100$

Temperaturmessung $\Delta T \rightarrow m \geq 100$

Durchflußmessung $\dot{m} \rightarrow n = 2$

Wegen $m, l \gg n$ läßt sich die Berechnung des relativen Fehlers des Wirkungsgrades vereinfachen.

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} \approx \pm \sqrt{\frac{(n-1) m l}{n m l - 1} \left(\frac{S \dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{S \Delta T}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{S \dot{G}}{\dot{G}} \right)^2}$$

Diese Gleichung ist eine Funktion von ΔT .

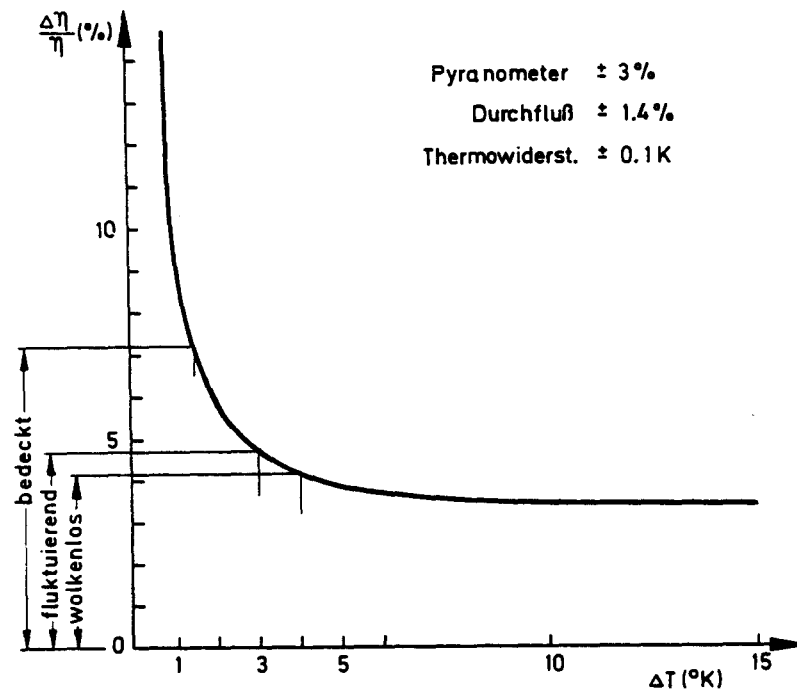


Abb. 6.1.1: Relativer Fehler des Wirkungsgrades als Funktion der Fluidertemperatur ΔT im Kollektor

Aus Abb. 6.1.1 ist zu sehen, daß die Fehlergrenze im Bereich kleiner Differenzen zwischen Ein- und Austrittstemperaturen stark anwächst. Deshalb ist für die Messungen bei bedeckten Witterungen mit einem höheren Fehler zu rechnen als an schönen Tagen.

Es sei darauf hingewiesen, daß diese Fehler die Abweichungen bezogen auf absolute Größen sind.

Die Fragestellungen dieser Arbeit sind jedoch auf Vergleichsmessungen ausgerichtet deren Fehlergrenzen erheblich unter denen in Abb. 6.1.1 liegen können.

6.2 Bestimmung des η_0 Punktes

In der Kollektorgrundgleichung für stationären Betrieb

$$\eta = (\tau \alpha)_e F' - \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

und das Produkt $(\tau \alpha)_e F'$ auch η_0 genannt

$$\eta = \eta_0 - \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

η_0 ist der maximal erreichbare Wirkungsgrad. Er wird unter folgenden Bedingungen erzielt:

- a) stationärer Betrieb
- b) keine thermischen Verluste

Die Bedingung ist praktisch nur dann zu erreichen, wenn $(T_F - T_L)$ gegen 0 strebt. T_F wird als mittlerer Fluidtemperatur bezeichnet und kann als arithmetisches Mittel zwischen Einlaß- und Auslaßtemperatur berechnet werden.

Für unsere Betrachtung hätte das die Forderung nach Unterkühlung der Eintrittsflüssigkeit um die halbe Temperaturerhöhung zur Folge. Man begnügt sich in der Praxis aber damit, die Eintrittstemperatur in die Nähe der Umgebungstemperatur zu legen um den Verlustterm klein zu halten.

$$\eta_0 = \eta + \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

$$\text{mit } \eta = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e)}{\dot{G} A}$$

In diesen Gleichungen sind der Verlustkoeffizient U_L und η_0 unbekannt. Alle anderen Größen liegen als Stoffgrößen oder Meßgrößen vor.

U_L ist aus einer Messung nach dem BSE-Verfahren als Funktion von $(T_F - T_L)$ und für die Windgeschwindigkeiten $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bekannt. Die Ergebnisse dieser Messung stimmen mit theoretischen Werten im Bereich zwischen $10^\circ \text{ K} < (T_F - T_L) < 70^\circ \text{ K}$ gut überein /2/.

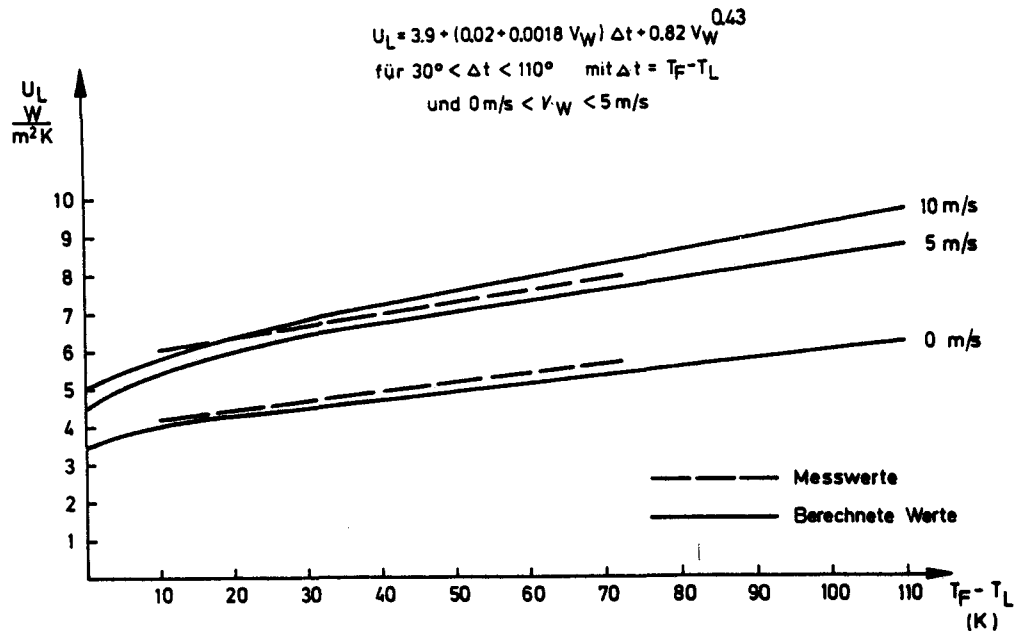


Abb. 6.2: Verlustkoeffizient des verwendeten Flachkollektors

Die Erfassung des Kennlinienfeldes als Gleichung ist zur Berechnung der thermischen Verluste in einigen Auswertungsprogrammen erforderlich. Ein Ansatz /6/ der Form $U_L = C_1 + (C_2 + C_3 V_W) (T_F - T_L) + C_4 V_W^{C_5}$ bringt für $30^\circ \text{ K} < (T_F - T_L) < 110^\circ \text{ K}$ und $0 \frac{\text{m}}{\text{s}} < V_W < 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit den Koeffizienten $C_1 = 3.9$, $C_2 = 0.02$, $C_3 = 0.0018$, $C_4 = 0.82$, $C_5 = 0.43$ recht gute Übereinstimmung.

6.2.1 Ermittlung des η_0 Punktes bei konstanter Einstrahlung

Zur Ermittlung des η_0 Punktes werden die Daten zweier Meßtage zur Mittagszeit herangezogen.

Diese beiden Meßperioden zeichneten sich durch folgende Bedingungen aus:

- a) hohe Strahlungswerte
- b) geringer Diffusanteil
- c) Strahlungswerte schwankten nur um 8.5% bzw. 3.5%
- d) Einfallswinkel der direkten Strahlung kleiner als 18°

Es wurden jeweils

- 1 Stundenwert
- 2 30-min-Werte
- 4 15-min-Werte

aus der einstündigen Messung ermittelt.

Das FORTRAN Programm berechnet dabei u.a. folgende Größen:

a) Mittelwerte:

Globalstrahlung \dot{G}

Diffusstrahlung \dot{G}_{DIF}

Temperaturdifferenz Fluid-Umgebung $T_F - T_L$

Windgeschwindigkeit V_W

b) Zeitdifferenz des Korrelationsmaximums zwischen

$\dot{G}(t)$ und $(T_a - T_e)(t)$

c) Nutzenergie $Q = \dot{m} c_F \int_{t_1}^{t_2} (T_a - T_e) dt$

Insolation $G = A \int_{t_1}^{t_2} \dot{G} dt$

Wirkungsgrad $= \frac{Q}{G}$

d) Es wird eine Kurve gezeichnet, die die Integrierte Nutzenergie und Insolation vom Startzeitpunkt t_1 bis zum Zeitpunkt t darstellt (Abb. 2).

$$Q(t) = \dot{m} c_F \int_{t_1}^t (T_a - T_e) dt$$

$$G(t) = A \int_{t_1}^t \dot{G} dt$$

Die Ergebnisse seien beispielhaft für den 31. August 1979 dargestellt.

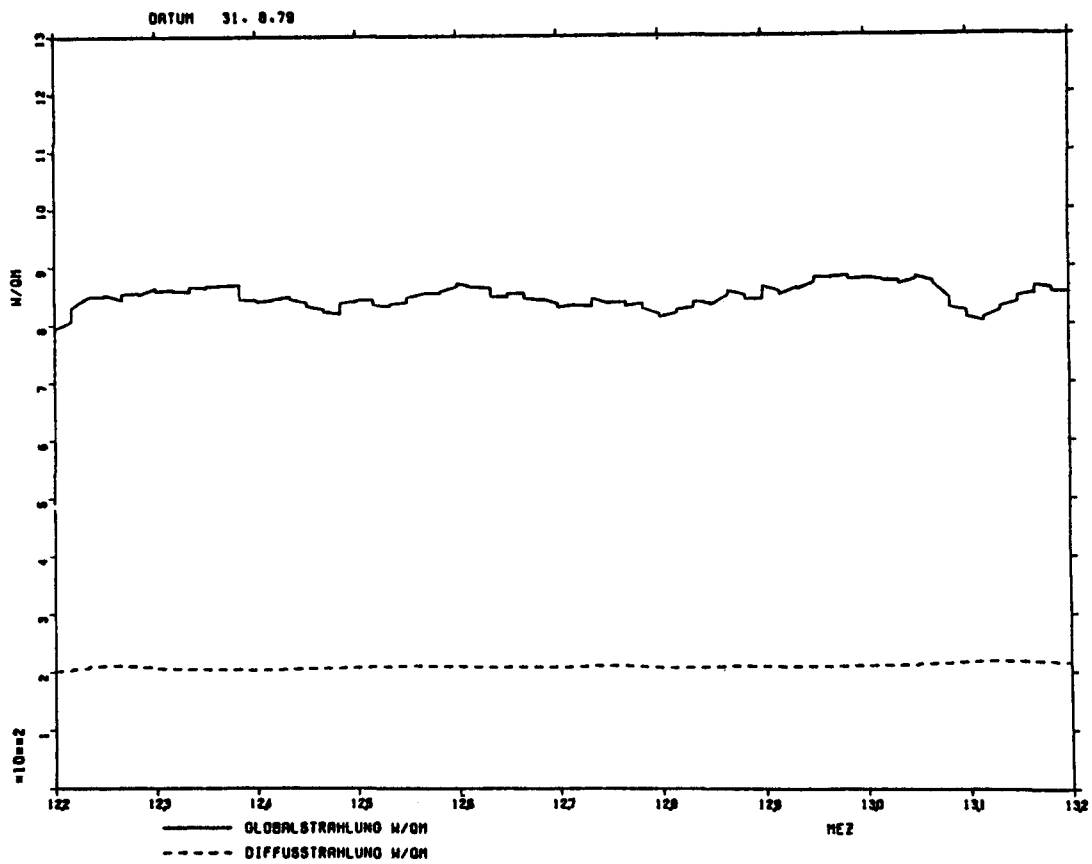


Abb. 6.2: Einstrahlungsprofil des 31.8.1979, 12¹² - 13¹² MEZ

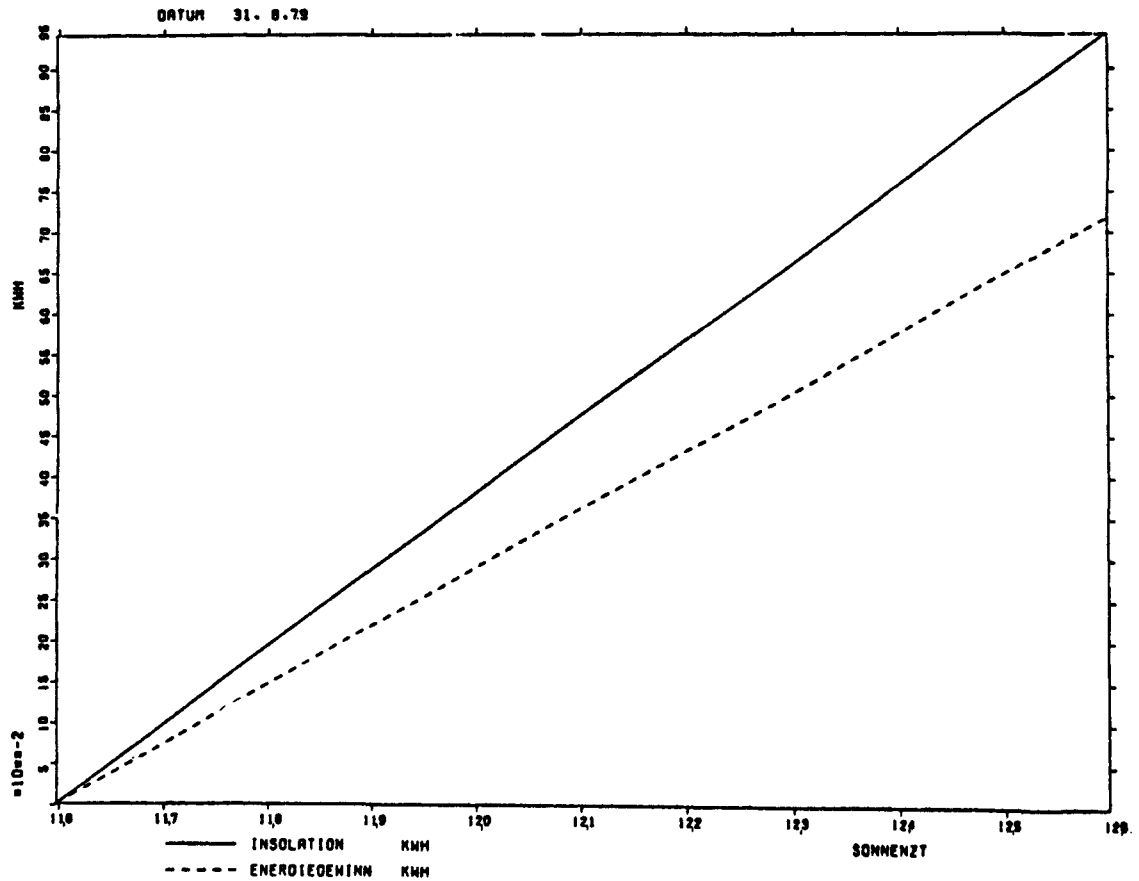
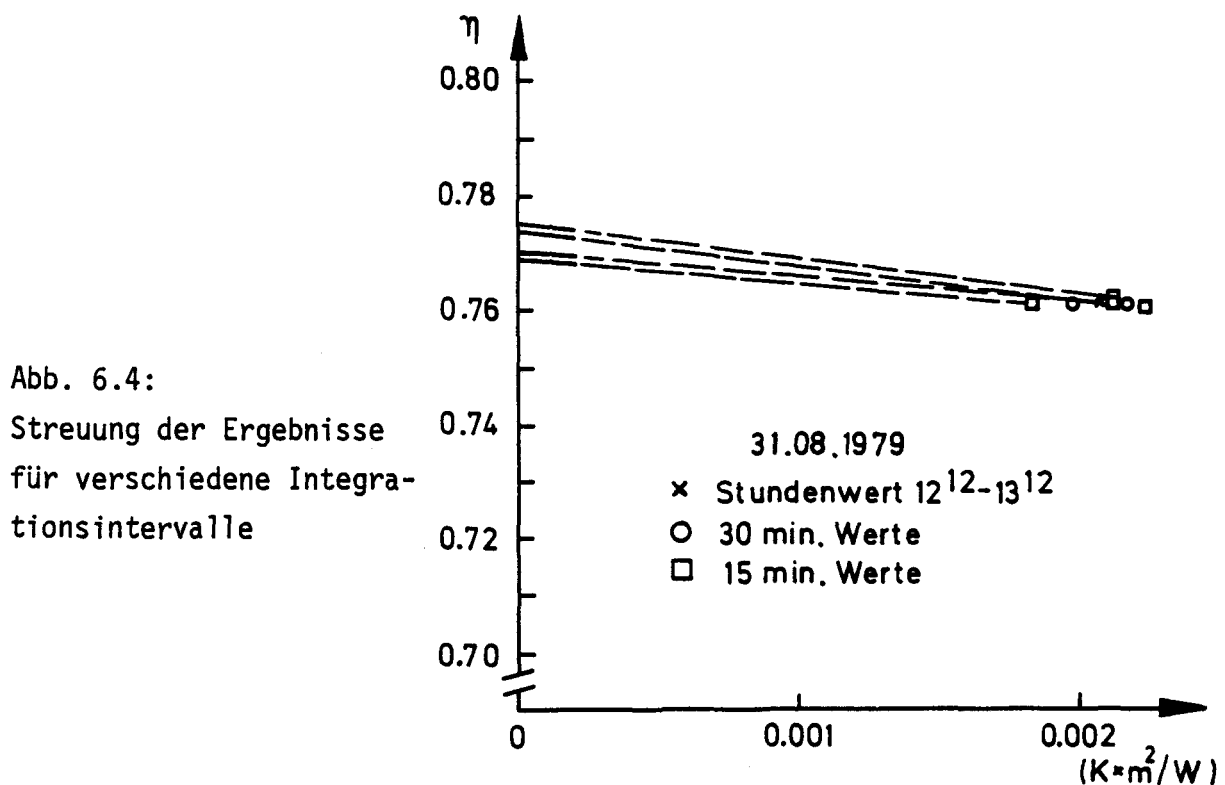


Abb. 6.3: Insolation und Energiegewinn des 31.8.1979, 12¹² - 13¹² MEZ

Aus Abbildung 6.3 läßt sich sehr einfach der Wirkungsgrad des Stundenwertes zu $\eta = 0.761$ ermitteln.

Die berechneten Werte wurden in ein $\eta - T^*$ Diagramm eingezeichnet (siehe Abbildung 6.4).

Mit Kenntnis von U_L aus Abb. 6.1 läßt sich die Steigung der Verlustgraden für den Betriebspunkt des Kollektors bestimmen. Die Verlustgraden wurden jeweils für $0 \frac{m}{s}$ und $5 \frac{m}{s}$ in das Diagramm eingezeichnet um den Windeinfluß auf das Ergebnis abschätzen zu können.



Man erkennt aus Abb. 6.4, daß bei den verwendeten Daten die Annahme, die Windgeschwindigkeit liege zwischen $0 \frac{m}{s}$ und $5 \frac{m}{s}$ zu einer Unsicherheit von 0.4% des Absolutwertes führt.

Der Einfluß der Länge der Integrationszeit auf das Ergebnis ist bei derzeitig konstanten Einstrahlungen sehr klein. Die Standardabweichungen für 15-min Werte sind $S_{15} = \pm 2.1 \cdot 10^{-4}$.

Die Bearbeitung der Mittagsstunde vom 30.8.1979 zeigt sehr ähnliche Ergebnisse.

Tabelle 6.1

Zusammenstellung der Ergebnisse

Datum	30.8.1979	31.8.1979
Meßzeit MEZ	11 ⁵⁴ - 12 ⁵⁴	12 ¹² - 13 ¹²
Mittlere Globalstrahlung $\frac{W}{m^2}$	955.	850.
Schwankung der Globalstrahlung %	3.0	8.5
Diffusanteil $= \frac{\dot{G}_{DIF}}{\dot{G}}$	0.13	0.25
Windgeschwindigkeit $\frac{m}{s}$	2.9	2.1
$T_F - T_L$ °K	1.9	1.7
η	0.761	0.761
η_o	0.777 \div 0.781	0.770 \div 0.774

6.2.2 Ermittlung des η_o Punktes bei fluktuierender Einstrahlung

Als nächster Bearbeitungsschritt wurden Mittagswerte bei fluktuierender Einstrahlung untersucht. Es wurden für 3 verschiedene Meßtage jeweils 1 Stunde bearbeitet.

Das Verfahren war das gleiche wie das unter 6.2.1 beschriebene. Die Ergebnisse seien für den 25. Juli 1979 dargestellt und diskutiert.

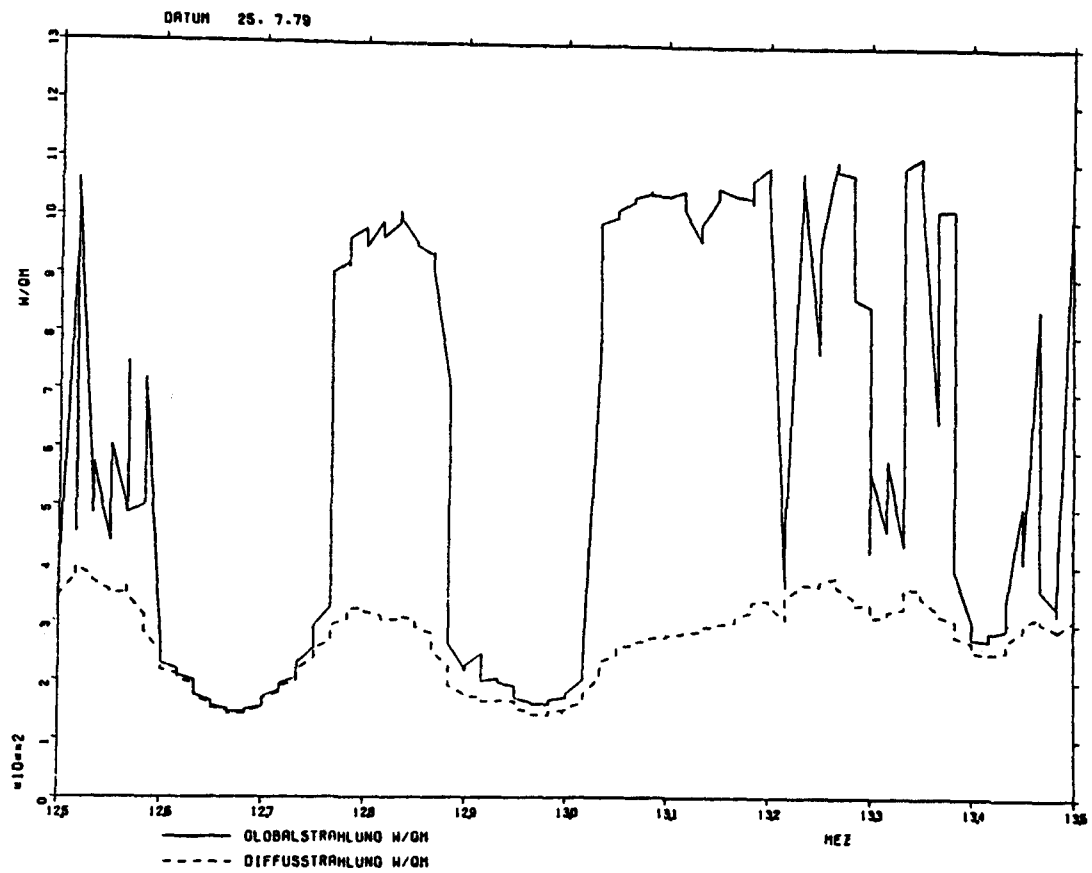


Abb. 6.5 zeigt den Verlauf der Globalstrahlung und der Diffusstrahlung von 1230 - 1330 MEZ

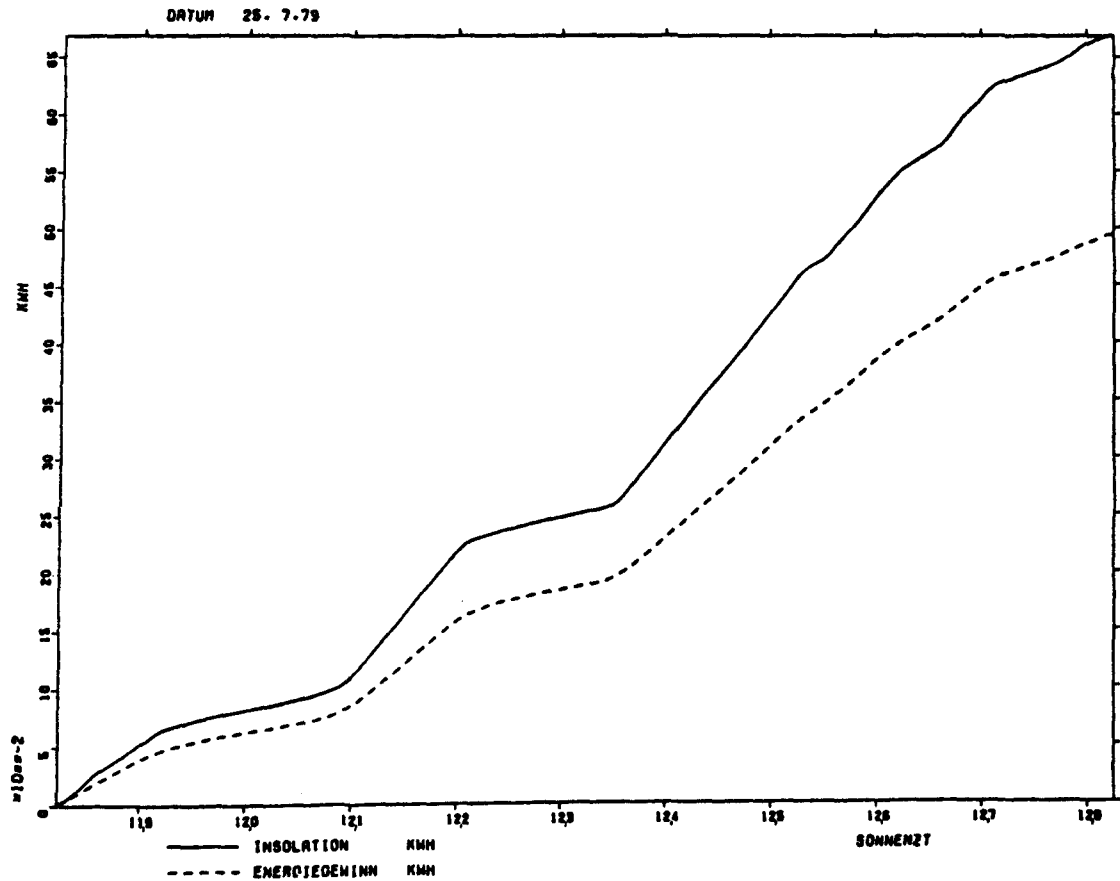
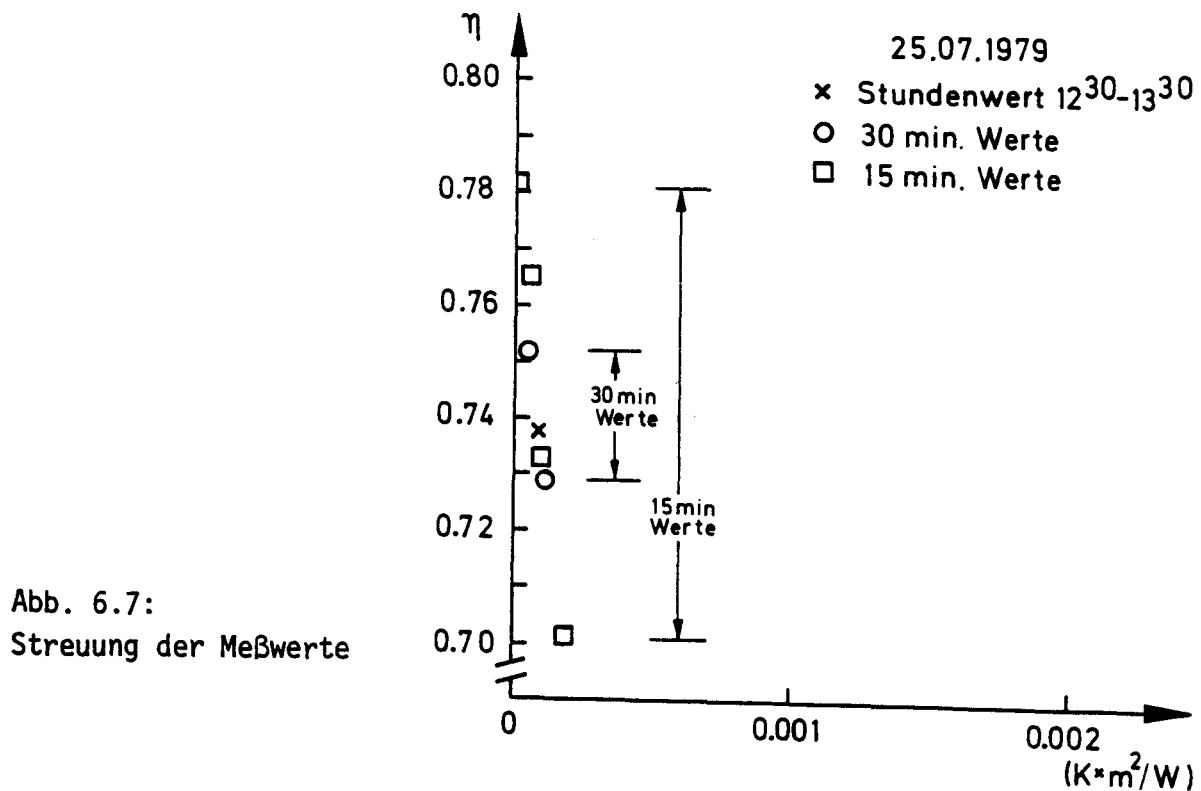


Abb. 6.6 zeigt die integrierte Nutzenergie und Insolation zwischen 1230 - 1330 MEZ

Wegen der besonders geringen Temperaturdifferenz ($T_F - T_L$) dieses Meßabschnittes sind die thermischen Verluste äußerst gering. Das drückt sich dadurch aus, daß die Meßpunkte in Abbildung 6.7 im Gegensatz zu Abbildung 6.4 nahe der Ordinate liegen. Der Windeinfluß, der in Abbildung 6.4 eine Unsicherheit von 0.4% hervorrief ist hier kleiner 1% und in Abbildung 6.7 nicht mehr darstellbar.



Es zeigt sich, daß die 15-min-Werte mit einer Standardabweichung von $S_{15} = \pm 3.1 \cdot 10^{-2}$ um den Stundenwert schwanken. Die Standardabweichung reduziert sich bei den 30-min-Werten auf $S_{30} = \pm 1.3 \cdot 10^{-2}$. Diese relativ großen Streuungen erklären sich durch das Wesen der fluktuierenden Strahlung und die Zufälligkeit der Integrationsgrenzen.

Die Streuungen ließen sich in der gleichen Größenordnung an anderen Meßtagen nachweisen.

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Stundenwerte mit fluktuierender Strahlung zusammengefaßt:

Tabelle 6.2

Datum	25.7.1979	26.7.1979	2.8.1979
Meßzeit MEZ	12 ³⁰ - 13 ³⁰	12 ⁰⁰ - 13 ⁰⁰	11 ³⁰ - 12 ³⁰
Mittlere Globalstrahlung $\frac{W}{m^2}$	604.	752.	824.
Diffusanteil $= \frac{G_{DIF}}{G}$	0.60	0.55	0.36
Windgeschwindigkeit m/s	4.3	3.0	4.3
$T_F - T_L$ °K	0.6	2.7	5.1
η	0.737	0.726	0.729
η_0	0.742 ÷ 0.743	0.740 - 0.747	0.755 - 0.766

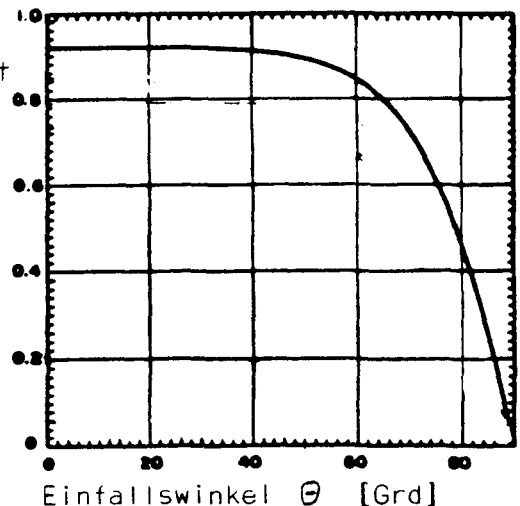
6.2.3 Wirkung des Diffusanteils auf den η_0 -Wert

Der η_0 -Wert setzt sich, wie in Abschnitt 2.2 und 6.2 beschrieben, aus dem Produkt $(\tau \alpha)_e$ und dem Absorberwirkungsgrad F' zusammen. Die Transmission τ sowie der Absorptionskoeffizient α sind Funktionen des Einstrahlwinkels θ . Für die Transmission einer Deckscheibe ist dieser Sachverhalt in Abbildung 6.8 dargestellt.

Abb. 6.8:

Transmission einer Glasscheibe (Brechungsindex = 1.53) ohne Berücksichtigung der Absorption (Duffie/Beckmann) in der Glasscheibe

Durchlässigkeit



Der Grund für dieses Verhalten ist eine starke Zunahme der Reflexionen an den Grenzflächen der Scheibe. Bis etwa $\theta = 30^\circ$ ist kaum eine Änderung von τ zu sehen.

Diesem Umstand ist in den Verschiedenen Testverfahren durch die Forderung $\theta > 30^\circ$ Rechnung getragen.

Über die Winkelabhängigkeit der Absorptionskoeffizienten α kann keine exakte Aussage gemacht werden weil es sich um eine Materialeigenschaft der Absorberbeschichtung handelt, die je nach Material stark variiert. Sicher ist nur, daß für $\theta > 60^\circ$ α ebenfalls abnimmt. Einen Einfluß auf das Produkt $(\tau \alpha)_e$ konnte für den verwendeten Kollektor nicht nachgewiesen werden. Durch Kenntnis der geografischen Daten des Aufstellungsortes, der Ausrichtung der Kollektorfläche und den Zeitdaten läßt sich der Einfallswinkel der direkten Strahlung zu jedem Datenpunkt bestimmen.

Die Verteilung der diffusen Strahlung über dem Kollektorhalbraum ist sehr unterschiedlich, wird aber aufgrund fehlender Daten als isotrop verteilt angenommen.

Aus geometrischen Betrachtungen folgt, daß die isotrope Diffusstrahlung näherungsweise einer direkten Strahlung mit $\theta = 60^\circ$ gleichgesetzt werden kann. /2/

Das Verhältnis der Transmission:

$$\frac{\tau(60^\circ)}{\tau(0^\circ)} = 0.905$$

In den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 wurde η_0 ungeachtet des Diffusanteils berechnet.

$$\eta = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e)}{\dot{G} A}$$

$$\eta_0 = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e)}{\dot{G} A} + U_L \frac{(T_F - T_L)}{\dot{G}}$$

$$\eta_0 = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e) + U_L A (T_F - T_L)}{\dot{G} A}$$

Jetzt spalten wir den Strahlungsterm in Direkt- und Diffusanteil auf:

$$\eta_{0DIF} = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e) + U_L A (T_F - T_L)}{((\dot{G} - \dot{G}_{DIF}) K_{(\theta)} + \dot{G}_{DIF} K_{(\theta = 60^\circ)}) A}$$

In der letzten Gleichung tauchen zwei Faktoren

K_θ und $K_{\theta = 60^\circ}$ auf

$$K_\theta = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0^\circ)}$$

Bei den Auswertungen der Kapitel 6.21 und 6.22 trat ein maximaler Einfallswinkel von 18° auf.

Aus Abbildung 6.8 ist zu sehen:

$\tau(18^\circ) \cong \tau(0^\circ)$ ist

daraus folgt $K_{(\theta)} = 1$.

Die Abweichungen aus dieser Annahme sind kleiner als 0.5%.

Der Faktor $K_{(\theta)} = 60^\circ$

ist schon weiter oben zu 0.905 berechnet worden damit ergibt sich

$$\eta_{\text{ODIR}} = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e) + U_L A (T_F - T_L)}{((\dot{G} - \dot{G}_{\text{DIF}}) + \dot{G}_{\text{DIF}} \cdot 0.905) A}$$

Durch die Bildung des Verhältnisses $\frac{\eta_o}{\eta_{\text{ODIR}}}$ entsteht

$$\frac{\eta_o}{\eta_{\text{ODIR}}} = 1 - \frac{\dot{G}_{\text{DIF}}}{\dot{G}} + \frac{\dot{G}_{\text{DIF}}}{\dot{G}} \cdot 0.905$$

$$\eta_o = \eta_{\text{ODIR}} \left(1 - (1 - 0.905) \frac{\dot{G}_{\text{DIF}}}{\dot{G}} \right)$$

$$\eta_o = \eta_{\text{ODIR}} \left(1 - 0.095 \frac{\dot{G}_{\text{DIF}}}{\dot{G}} \right)$$

$$\eta_o = \eta_{\text{ODIR}} (1 - 0.095 \delta)$$

Dieser Zusammenhang stellt im $\eta_o - \delta$ Diagramm eine fallende Gerade mit einem Schnittpunkt der Ordinate η_{ODIR} dar.

Die Meßwerte der Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 wurden in ein $\eta_o - \delta$ Diagramm eingetragen (Abbildung 6.9). Durch lineare Regression wurde der Zusammenhang $\eta_o = 0.792 - 0.0749\delta$ gefunden.

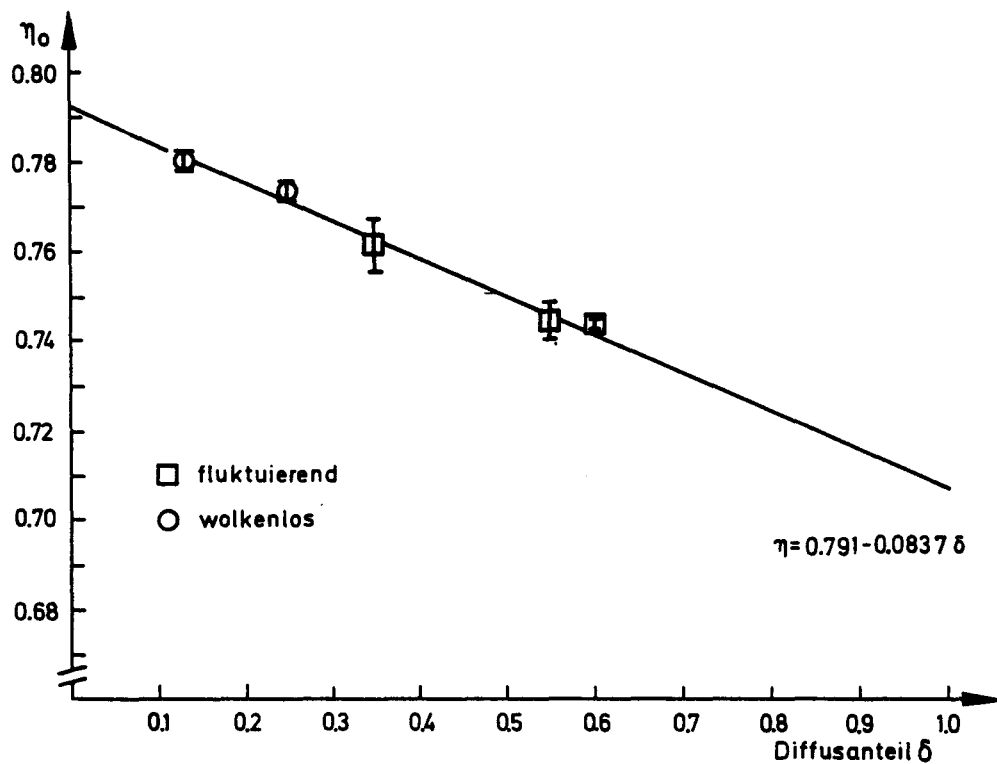
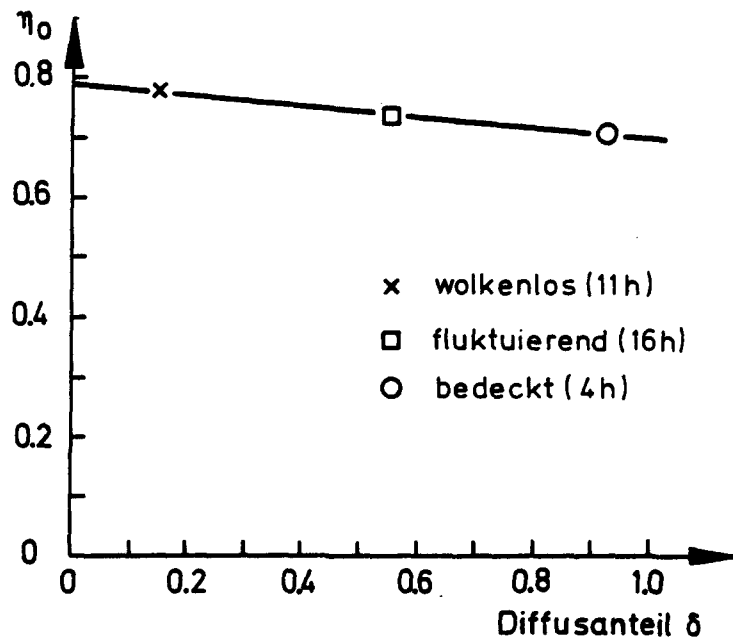


Abb. 6.9: Einfluß des Diffusanteils der Globalstrahlung auf den Wirkungsgrad

Wie aus Abbildung 6.9 zu sehen ist, ist die Steigung der Geraden mit der aus den theoretischen Überlegung folgenden $\eta = 0.792 - 0.0752 \delta$ praktisch identisch.

Bei einer Überprüfung der Ergebnisse durch das gesamte Datenmaterial wurde nochmals der Einfluß des Diffusanteils auf den η_0 Punkt untersucht. Es wurden Meßperioden mehrerer Tage zu Klassen zusammengefaßt. Dabei wurden die Klassen "wolkenlos", "stark fluktuierend" und "bedeckt" gebildet.

Abb. 6.14:
Abhängigkeit des Wirkungs-
grades vom Diffusanteil δ



Die Verminderung des Wirkungsgrades in der Nähe des η_0 Punktes ist also gut durch den Einfluß des Diffusanteils erklärbar. Dabei ist es gleichgültig, ob es sich um fluktuierende oder konstante Einstrahlung handelt.

6.2.4 Bestimmung des η_0 Punktes aus der Leerlauftemperatur

Wird keine Nutzleistung aus dem Kollektor entzogen und existieren quasistationäre Bedingungen, so ist die linke Seite der Kollektorgrundgleichung gleich 0.

$$\eta = 0 = \eta_0 - \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

daraus folgt

$$\eta_0 = \frac{U_L}{\dot{G}} (T_F - T_L)$$

Im Leerlauf ist T_F gleich der Absorberplattentemperatur T_P

$$\eta_0 = \frac{U_L}{\dot{G}} (T_P - T_L)$$

Der Absorber-Wirkungsgrad F' tritt in diesen Gleichungen nicht auf, weil keine Wärmeleitung zwischen Absorber und Fluid stattfindet. In der zuletzt genannten Gleichung sind \dot{G} , T_L , T_P Meßwerte. η_0 ist direkt proportional zu U_L , so daß sich Fehler von U_L in gleicher Höhe auf η_0 übertragen. U_L liegt als Kennlinie für $0 \frac{m}{s}$ und $5 \frac{m}{s}$ in Abbildung 6.1 vor. Sollten nur diese Werte zur Berechnung von η_0 zugelassen sein, so ergäben sich Fehler zwischen $\pm 10\%$ bis $\pm 15\%$ für η_0

Es ist also in diesem Fall unbedingt erforderlich, den Einfluß der Windgeschwindigkeit genauer zu berücksichtigen. U_L wird in der im Kapitel 6.2 beschriebenen Form interpoliert.

Für 7 verschiedene Leerlauftemperaturen wurden die η_0 Punkte mit diesen Werten berechnet. Als wirksame Windgeschwindigkeit wurde ein Mittelwert der letzten 10 Minuten vor dem Zeitpunkt der Leerlauftemperaturmessung abgeschätzt. Dabei erfolgt die Schätzung auch nur auf $\pm 0.5 \frac{m}{s}$. Die Meßdaten und Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 dargestellt.

Datum	Uhrzeit MEZ	\dot{G} w/m ²	\dot{G}_{DIF} w/m ²	$\delta = \frac{\dot{G}_{DIF}}{\dot{G}}$	$T_P - T_L$	V_W m/s	$\frac{U_L}{K \frac{m^2}{W}}$	η_0
29.8.79	13 ⁰⁰	932.	140.	0.15	99.3	2.0	7.35	0.783
30.8.79	12 ⁴²	964.	115.	0.12	95.1	4.0	7.97	0.786
31.8.79	13 ¹⁸	876.	216.	0.25	90.0	3.0	7.50	0.771
5.9.79	13 ⁰⁰	876.	230.	0.26	92.9	2.0	7.20	0.764
6.9.79	12 ³⁶	940.	129.	0.13	94.6	3.5	7.79	0.784
14.9.79	12 ³³	964.	77.	0.08	100.7	2.5	7.58	0.791
2.10.79	12 ⁵⁴	600.	280.	0.47	66.0	3.0	6.87	0.756

Die Fehlerabschätzung für die Unsicherheit der Bestimmung der Windgeschwindigkeit auf $\pm 0.5 \frac{m}{s}$ ergibt folgende Werte:

$$\frac{\partial U_L}{\partial V_W} = 0.0018 (T_P - T_L) + 0.82 \cdot 0.43 V_W^{-0.57}$$

Als typische Werte von $(T_P - T_L)$ und V_W wird gewählt:

$$(T_P - T_L) = 90^\circ \text{ K}$$

$$V_W = 3 \frac{m}{s}$$

$$\frac{\partial U_L}{U_L} = \pm 0.5 \frac{0.351}{7.5} = \pm 2.34 \cdot 10^{-2} \hat{=} \pm 2.4\%.$$

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.10 dargestellt.

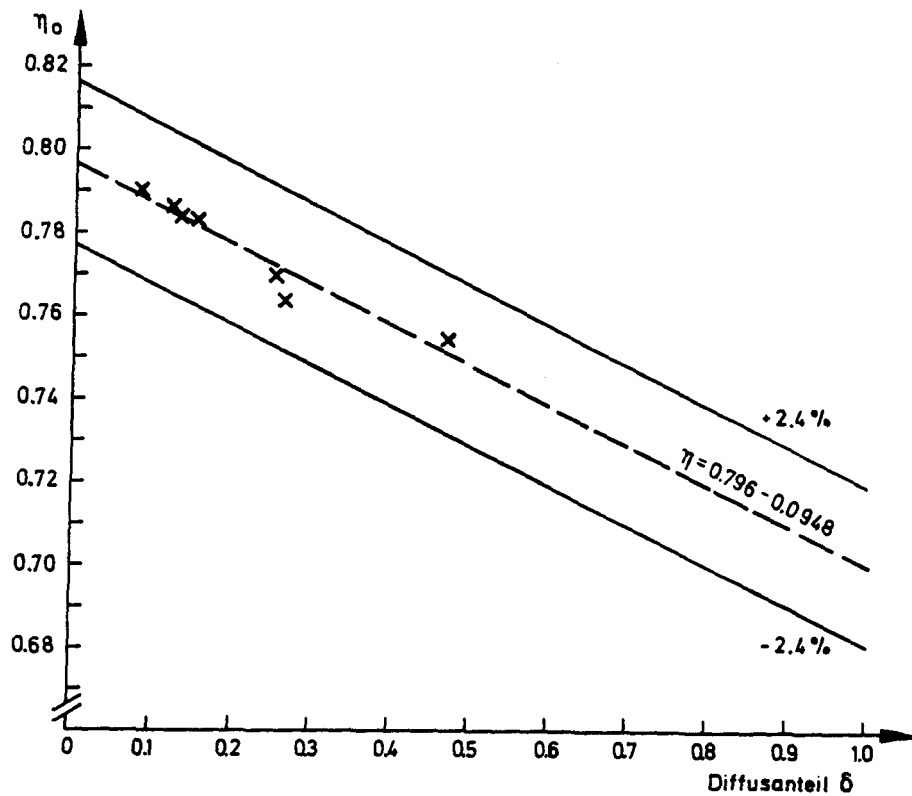


Abb. 6.10: Einfluß des Diffusanteils δ auf den Wirkungsgrad ermittelt aus Leerlauftemperaturen

Die Meßpunkte fallen erstaunlich gut mit der in Kapitel 6.23 ermittelten Kennlinie zusammen und zeigen das gleiche Verhalten bezüglich des Diffusanteils.

6.2.5 Einfluß des Einfallswinkels der direkten Strahlung auf den η_0 Punkt

Schon in Kapitel 6.23 wurde ausführlich über die Winkelabhängigkeit des Produktes $(\tau \alpha)_e$ gesprochen. Bei den Daten, die bisher ausgewertet wurden, war der Einfallswinkel θ der direkten Strahlung ($\dot{G} - \dot{G}_{DIF}$) stets kleiner als 18° , so daß der Winkелеinfluß auf die direkte Strahlung vernachlässigt werden konnte. Sollen Daten bearbeitet werden, die bei großen Einfallswinkeln aufgenommen worden sind, so muß in der in Kapitel 6.2.3 entwickelten Gleichung

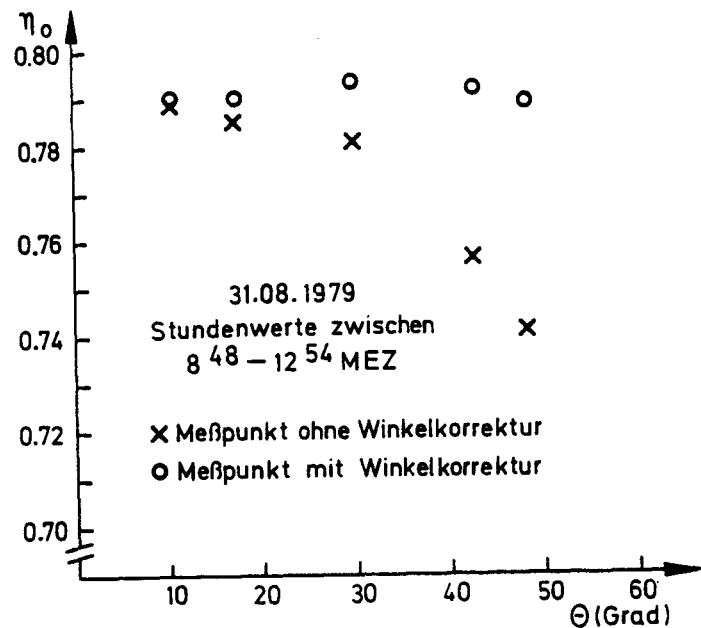
$$\eta_0 = \frac{\dot{m} c_F (T_a - T_e) + U_L A (T_F - T_L)}{((\dot{G} - \dot{G}_{DIF}) K_{(\theta)} + \dot{G}_{DIF} K_{(\theta=60^\circ)}) A}$$

$K_{(\theta)}$ für die relevanten Zeitpunkte berechnet werden.

Beispielhaft wurde das für die Messungen des 31.8.79 durchgeführt und in Abbildung 6.11 dargestellt.

Abb. 6.11:

Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Einfallswinkel der direkten Strahlung



Es ist für $\theta \geq 30^\circ$ eine deutliche Abnahme des Wirkungsgrades zu verzeichnen, die aber gut durch die verminderte Transmission und der daraus abgeleiteten Winkelkorrektur $K_{(\theta)}$ erklärt werden kann.

Es soll an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, daß auch der Absorptionskoeffizient α winkelabhängig ist. Dieser Einfluß ist aber durch das untersuchte Datenmaterial nicht nachzuweisen gewesen. Es ist jedoch möglich, daß der Effekt erst bei Einfallswinkels $\theta > 60^\circ$ zum Tragen kommt.

6.2.6 Berechnung der Nutzenergie unter Verwendung der Ergebnisse aus Kap.

6.2 + 6.25

Ziel dieser Arbeit ist es, bei Kenntnis der Strahlungsdaten und der Kollektordaten Aussagen über die zu erwartende Nutzenergie zu machen. Hierzu sollen die Ergebnisse aus Kapitel 6.2 + 6.2.5 herangezogen werden. Verglichen wird die gemessene Nutzenergie mit der berechneten. Zur Berechnung werden 2 verschiedene Verfahren verwendet:

- 1.) Zur Berechnung sollen folgende zeitabhängige Meßdaten zur Verfügung stehen

- a) Globalstrahlung \dot{G}
 b) Diffusanteil $\delta = \frac{\dot{G}_{DIF}}{\dot{G}}$
 c) Temperaturniveau $(T_F - T_L)$

Außerdem müssen vorliegen:

$U_L \rightarrow$ Kapitel 6.2

$\eta_{oDIR} \rightarrow$ Kapitel 6.2.3

$A \rightarrow$ Kollektordaten Kapitel 3.4

$K_{(\theta)} \rightarrow$ Tabelle, Diagramm

Die Berechnung erfolgt durch folgende Gleichung

$$Q_{MOD} = A \int_{t_1}^{t_2} \left(\left(\frac{\dot{G}_{DIF}}{\dot{G}} \cdot 0.905 + \frac{\dot{G} - \dot{G}_{DIF}}{\dot{G}} K_{(\theta)} \right) \eta_{oDIR} \dot{G} - U_L (T_F - T_L) \right) dt$$

$$Q_{MOD} = A \int_{t_1}^{t_2} \left((0.905\delta + (1-\delta) K_{(\theta)}) \eta_{oDIR} \dot{G} - U_L (T_F - T_L) \right) dt$$

Um eine Aussage über den Wert dieses Verfahrens zu erhalten, soll die Nutzenergie auch nach einer anderen Methode ermittelt werden.

2.) Benötigte Meßdaten:

Globalstrahlung \dot{G}

Kollektordaten:

η_o aus BSE-Testprozedur

Die Berechnung erfolgt durch die Gleichung:

$$Q = A \eta_{oBSE} \int_{t_1}^{t_2} \dot{G} dt$$

Die Berechnung wurden für 2 verschiedene Meßtage vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.12 und 6.13 und in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4:

Datum	25.7.79	31.8.79
Integrationszeit t_1, t_2 MEZ	11 ³⁰ - 16 ³⁰	8 ⁴⁶ - 13 ¹²
Einstrahlungsverlauf	fluktuierend	stabil
Gemessene Nutzenergie Q_{MESS} kWh	2.30 ± 0.04	2.59 ± 0.03
Berechnete Nutzenergie	1. Methode Q_{MOD} kWh	2.34
	2. Methode Q_{BSE} kWh	2.43
$\frac{Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{BSE}}}{Q_{\text{MESS}}} \cdot 100\%$	5.7	5.8
$\frac{Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{MOD}}}{Q_{\text{MESS}}} \cdot 100\%$	1.7	1.1

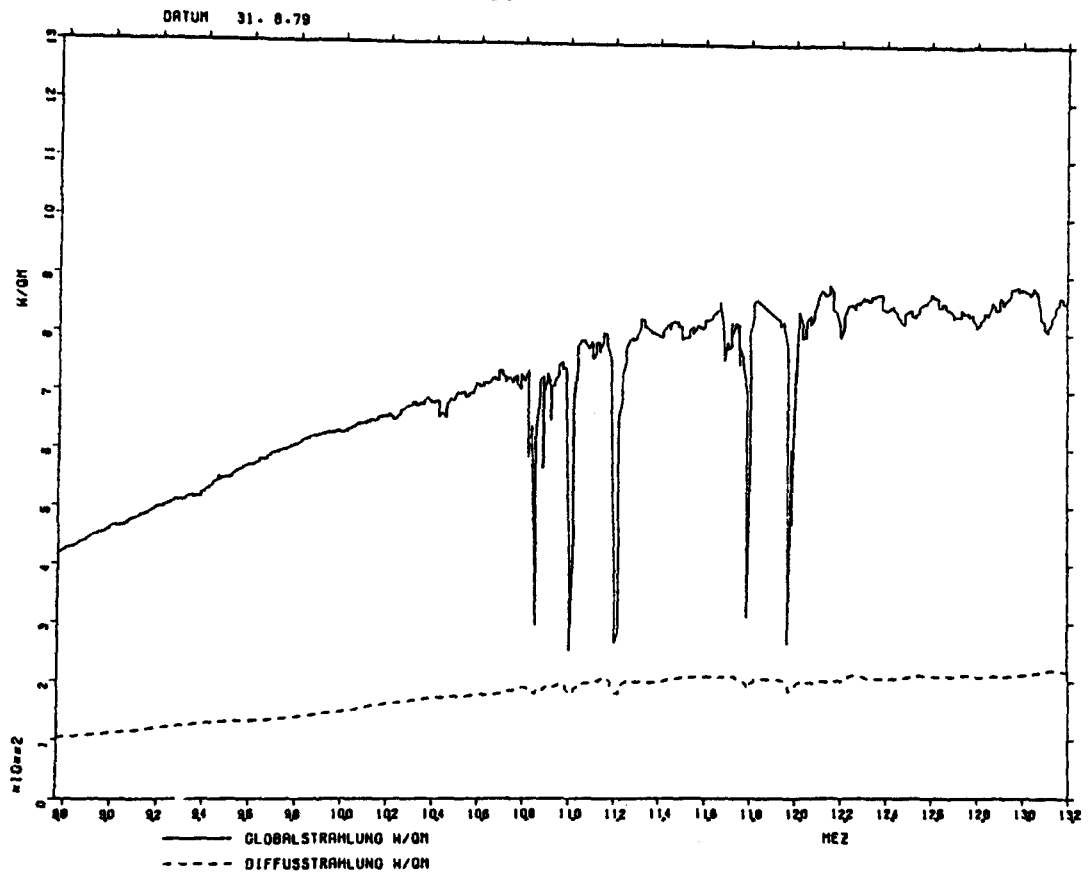


Abb. 6.12.1: Strahlungsprofil des 31.8.79 von 8⁴⁶ - 13¹² MEZ

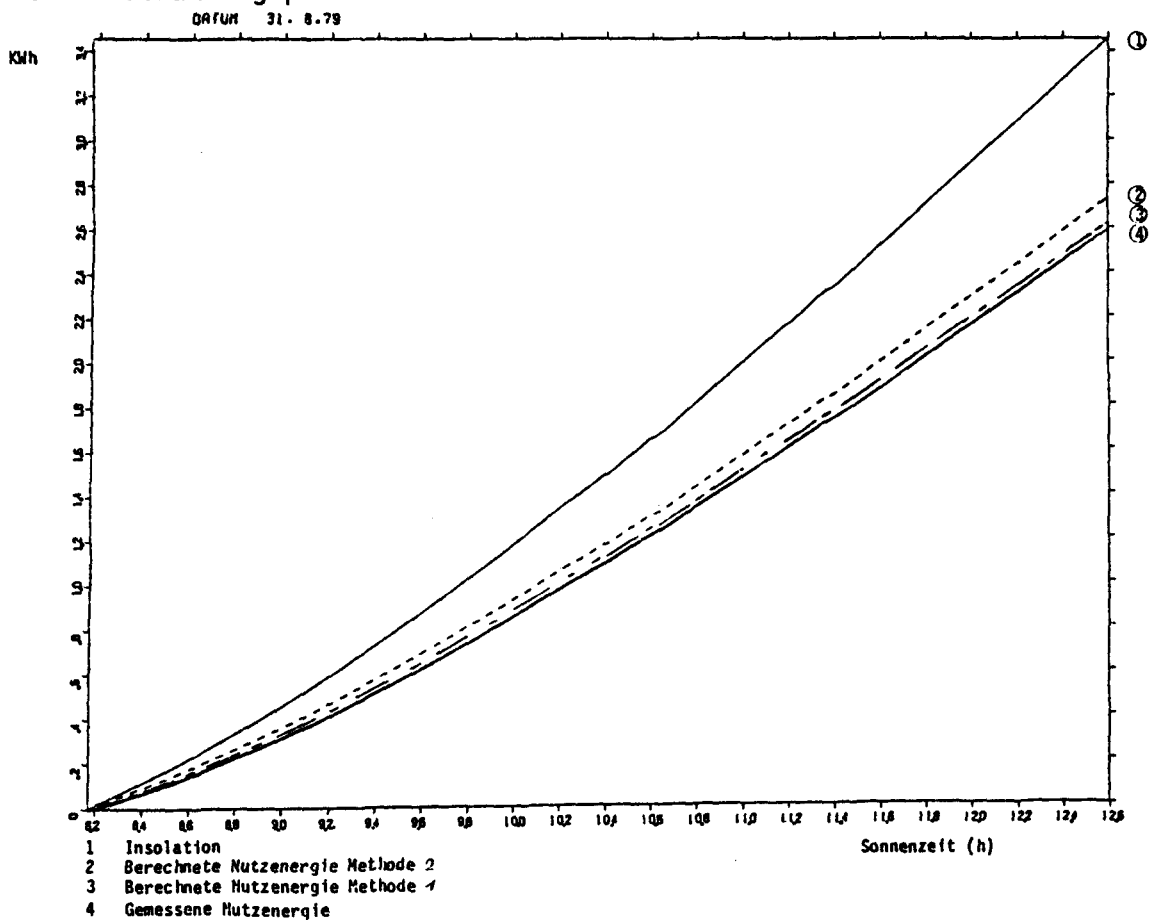


Abb. 6.12.2: Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Nutzenergie an einem "klaren Tag"

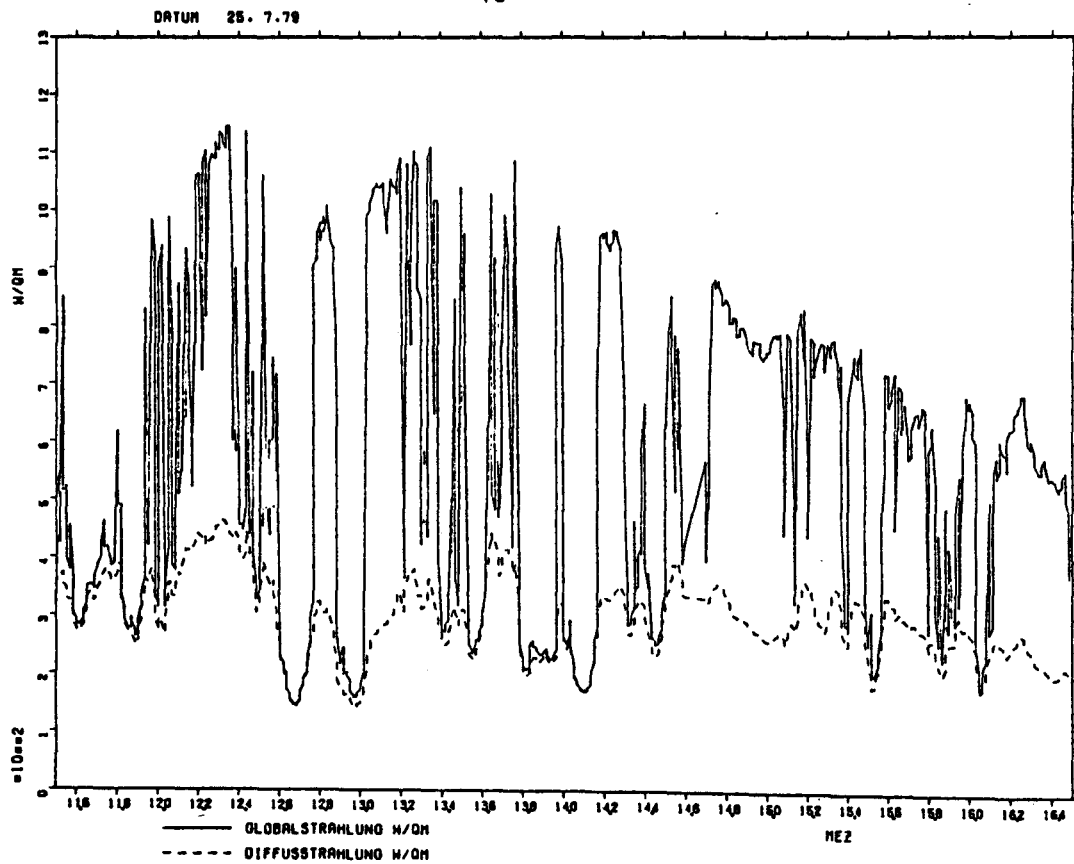


Abb. 6.13.1: Strahlungsprofil des 25.7.79 von 11³⁰ - 16³⁰ MEZ

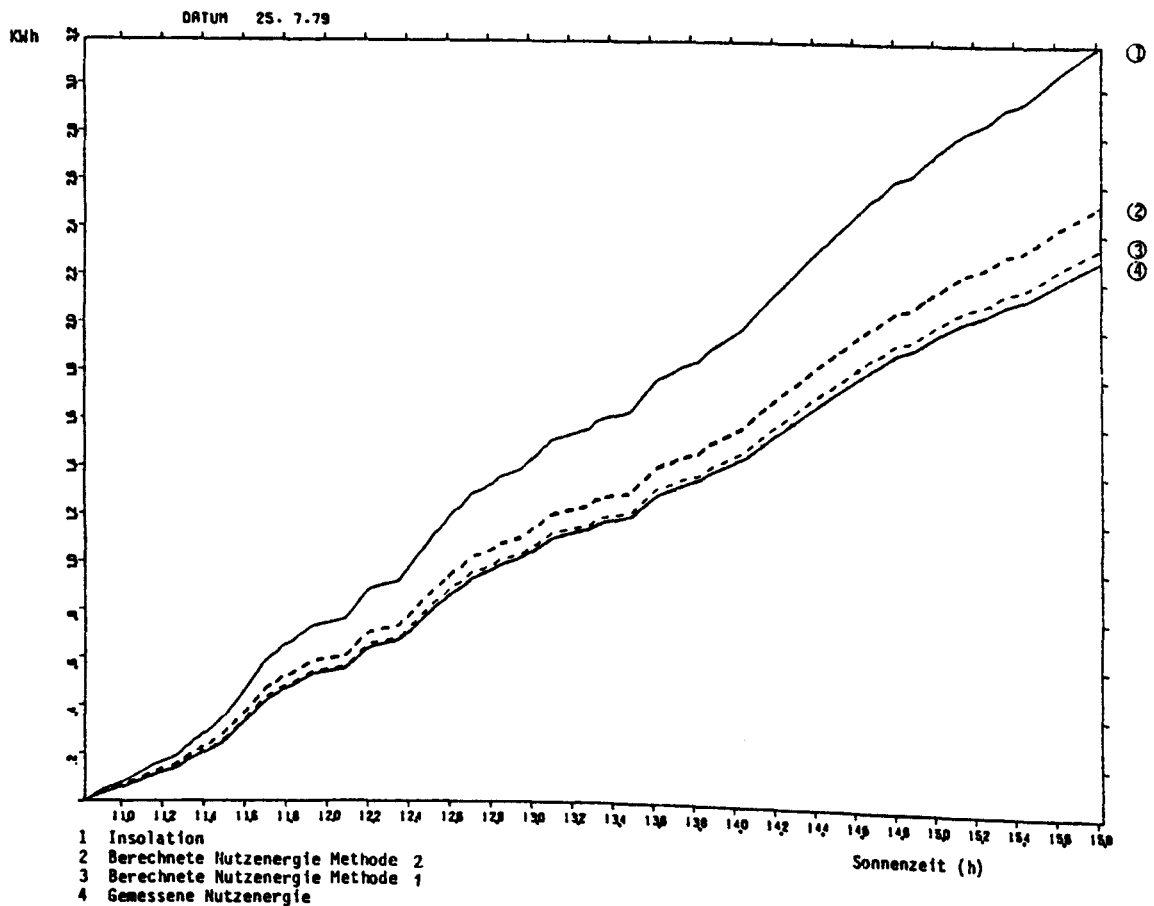


Abb. 6.13.2: Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Nutzenergie an einem Tag mit wechselnder Einstrahlung

Die Näherung des berechneten Wertes an den gemessenen ist bei Verwendung von Methode 1 ausgezeichnet. Die Verbesserung der Methode 1 gegenüber Methode 2 ist erheblich.

6.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse des Kapitels 6.2

Die in den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 behandelten Integrationsintervalle zeigen, daß die Wahl der Integrationsintervalldauer an den wolkenlosen Tagen mit stationärer Einstrahlung unkritisch ist. Die Streuung der einzelnen 15-min Werte in den Stundenwert betrugen etwa 1%. Die Vorschriften der BSE-Testprozedur die vier 15-min Werte zur n_0 Messung vorschreibt, könnte in diesem Punkt weniger streng gefaßt werden.

Selbst bei fluktuierender Einstrahlung ist es möglich n_0 mit guter Reproduzierbarkeit zu bestimmen, wenn die Wirkung des Diffusanteils nach Kap. 6.23 berücksichtigt wird. Die Integrationsdauer sollte jedoch länger sein als bei stationärer Einstrahlung. Typische Streuungen der 30-min Werte lagen bei $\pm 1.5\%$ gegenüber Stundenwerten.

Über die Zuverlässigkeit von Integrationsintervallen sollten noch eingehendere Untersuchungen durchgeführt werden, wenn es möglich ist, fluktuierende Strahlung genauer zu definieren.

Das in Kap. 6.2.4 angewandte Verfahren zur Bestimmung des n_0 Punktes liefert brauchbare Ergebnisse bei genauer Kenntnis von $U_L = U_L ((T_F - T_L), V_W)$. Die Sicherheit der n_0 -Punkt-Bestimmung kann, durch die genauere Bestimmung der relevanten Windgeschwindigkeit verbessert werden.

Möchte ein Anwender die Nutzenergie eines Kollektors aus vorhandenen meteorologischen Daten vorbestimmen, muß er sich klar darüber sein, mit welcher Genauigkeit er die Nutzenergie berechnen, und wieviel Aufwand er dafür betreiben möchte.

Das als Methode 2 bezeichnete Verfahren, das im letzten Kapitel vorgestellt wurde ist sehr einfach, für Handrechnungen geeignet und benötigt lediglich die Strahlungsdaten und den Konversionsfaktor n_0 .

Die Ergebnisse dieser Methode sind unter bestimmten Voraussetzungen, nämlich des Testbedingungen unter denen n_0 bestimmt wurde, recht gut.

Das als Methode 1 bezeichnete Verfahren lieferte bei allen untersuchten Daten Genauigkeiten von $\pm 2\%$. Dafür ist die Berechnung aufwendiger geworden, besonders was die Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit der direk-

ten Strahlung betrifft. Zwischen Methode 1 und Methode 2 sind verschiedene Zwischenlösungen denkbar. Bei der Wahl der Berechnungsmethode und der zu berücksichtigenden Korrekturen des η_0 -Wertes sollte auch daran gedacht werden, daß der Energieumsatz während der Mittagszeit an klaren Tagen einen größeren Beitrag zur auf den Tag bezogenen Nutzenergie liefert als an bewölkten Tagen.

Der Kollektor verhält sich in der Nähe des η_0 Punktes als lineares Übertragungsglied. Besondere Einbußen des Wirkungsgrades bei fluktuierender Strahlung traten nicht auf, wenn man in die Betrachtungen Reflexionsverluste - also Diffusanteil und Winkelkorrektur der direkten Strahlung - und thermische Verluste mit einbezieht.

6.3 Kollektorverhalten bei erhöhten Vorlauftemperaturen

Bei Kenntnis des Verlustfaktors $U_L = U_L ((T_F - T_L), V_W)$ wie er in Kapitel 6.2 behandelt worden ist, lassen sich die Wirkungsgradkennlinien für verschiedene Einstrahlungen \dot{G} , Diffusanteile δ und Windgeschwindigkeiten berechnen. Die drei genannten meteorologischen Einflüsse wirken sich bei erhöhtem Temperaturniveau des Kollektors zunehmend auf den Wirkungsgrad aus, was sich durch eine Spreizung der Kennlinienfelder bei größer werdenden T^* darstellt (Abb. 6.3.2). Diese Kennlinien sollen zunächst für Betriebspunkte mit erhöhter Vorlauftemperatur zwischen 40°C und 60°C und stationärer Einstrahlung auf ihre Brauchbarkeit überprüft werden bevor sie als Referenz für fluktuierende Einstrahlung verwendet werden.

6.3.1 Wirkungsgradbestimmung bei stabilen Wetterlagen und erhöhten Vorlauftemperaturen

Die Anwendbarkeit der in Kap. 6.2 erarbeiteten Ergebnisse für den veränderten Betriebspunkt des Kollektors soll in diesem Kapitel überprüft werden.

Dazu wurden zunächst zwei Meßabschnitte mit stabiler Einstrahlung behandelt. Die Ergebnisse des 6.9.79 seien hier als Beispiel dargestellt.

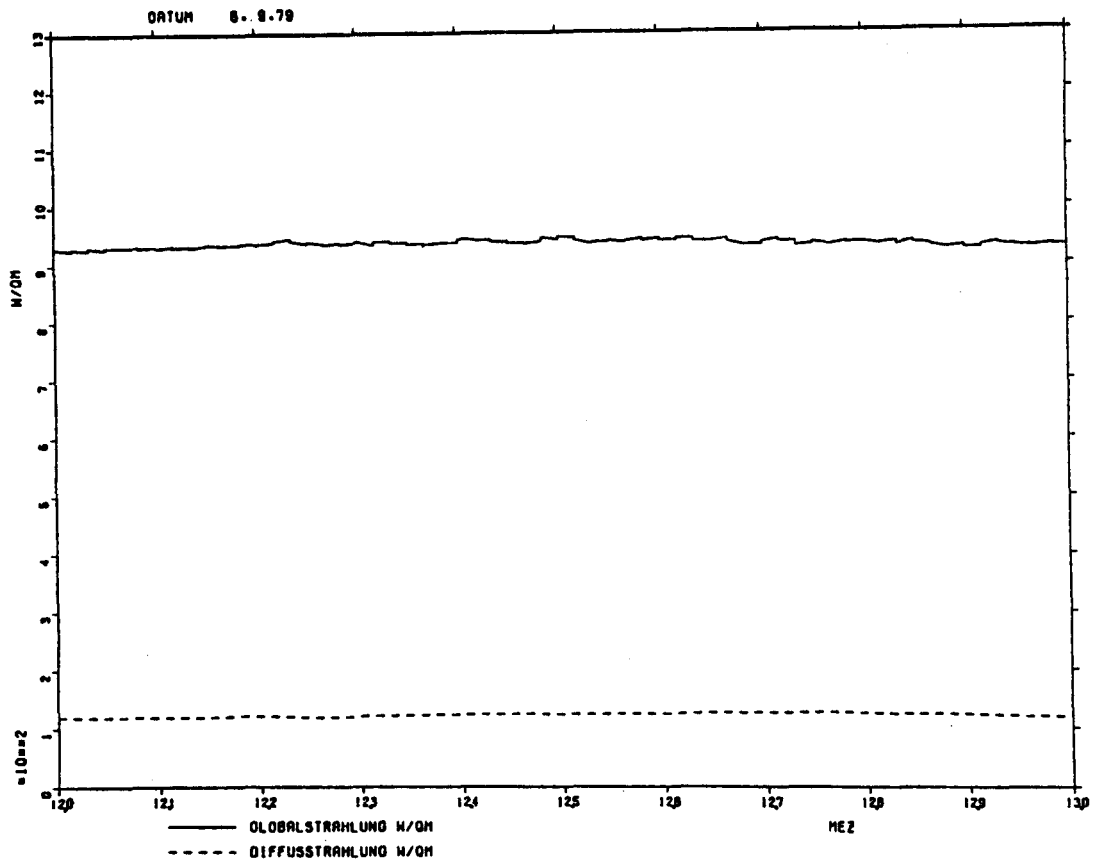


Abb. 6.3.1: Einstrahlungsverhältnisse 6.9.79, 12⁰⁰ - 13⁰⁰ MEZ

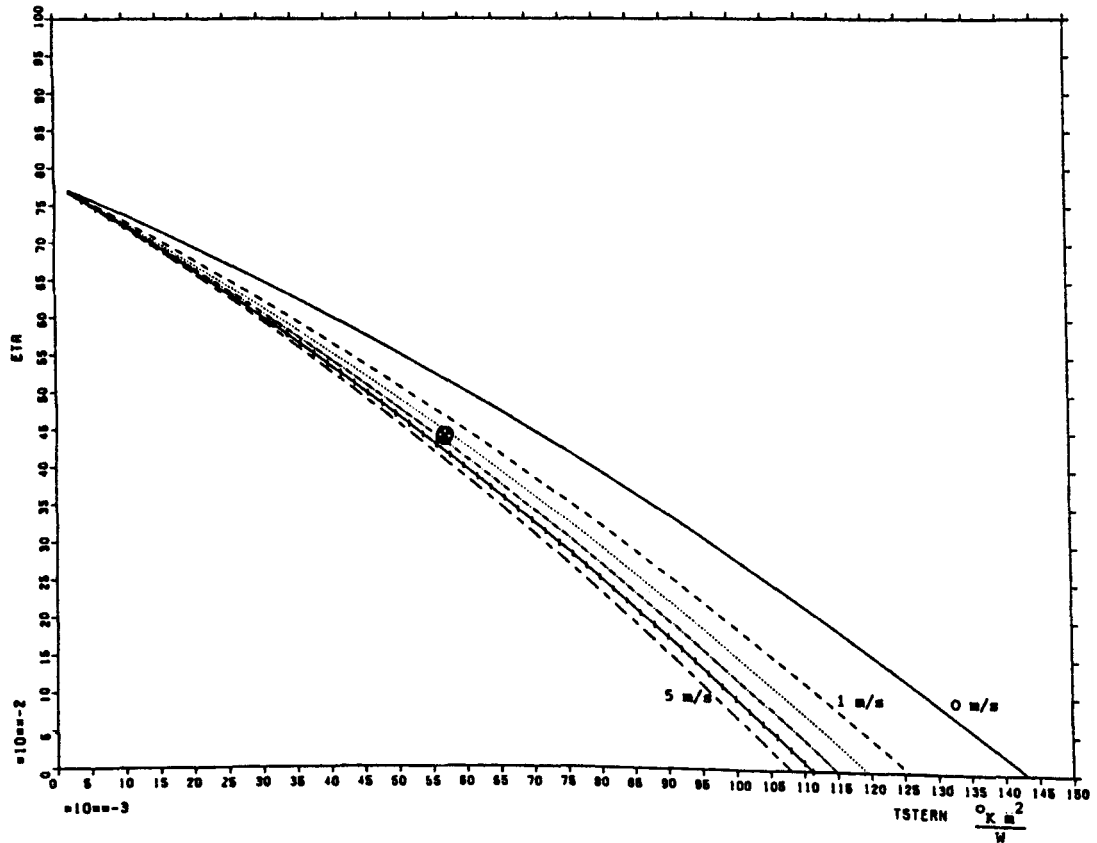


Abb. 6.3.2: Darstellung des Meßergebnisses im Kennlinienfeld für $\dot{G} = 900 \frac{W}{m^2}$ und $\delta = 0.13$

Tabelle 6.5 faßt die Ergebnisse der Meßabschnitte zusammen.

Datum		5.9.79	6.9.79
Uhrzeit	MEZ	10 ²⁴ - 11 ²⁴	12 ⁰⁰ - 13 ⁰⁰
\bar{G}	$\frac{W}{m^2}$	765.	927.
$\frac{\dot{G}_{MAX} - \dot{G}_{Min}}{\bar{G}}$	%	22.	2.7
$T_F - T_L$	K	40.4	52.9
T^*	$\frac{K \cdot m^2}{W}$	0.0527	0.0571
V_W	$\frac{m}{s}$	1.5	2.5
η_{MESS}		0.496 ± 0.019	0.440 ± 0.013
η_{MOD}		0.474	0.435
$\eta_{MESS} - \eta_{MOD}$	%	2.2	0.5

Die auftretenden Abweichungen lassen sich durch folgende Unsicherheiten erklären:

- 1.) Bestimmung der effektiv in Deckscheibenumgebung herrschenden Windgeschwindigkeit. Diese Größe läßt sich aus Unkenntnis der Strömungsverhältnisse nur unsicher angeben.

Die Annahme, die Luftbewegung weiche um $\pm 0.5 \frac{m}{s}$ von der gemessenen Windgeschwindigkeit ab, führt zu einem Fehler von $\pm 2.4\%$ bei der Bestimmung der thermischen Verluste.

- 2.) Bei sinkendem Wirkungsgrad wird die Nutzleistung geringer und damit die Temperaturdifferenz ($T_a - T_e$) kleiner. Aus Abb. 6.1.1 wird deutlich, daß für kleiner werdende ($T_a - T_e$) die Unsicherheit erheblich steigt.

Unter Berücksichtigung dieser Umstände kann eine Übereinstimmung der Meßwerte mit dem Kennlinienfeld festgestellt werden.

6.3.2 Vergleich der gemessenen und berechneten Nutzenergie für einen "klaren Tag"

Die Übereinstimmung des Wirkungsgrades mit den theoretischen Werten des Kennlinienfeldes wurde für Stundenwerte im vorangegangenen Kap. 6.3.2 festgestellt.

In diesem Abschnitt soll für eine Meßdauer von 6 h der Vergleich zwischen gemessener und berechneter Nutzenergie durchgeführt werden.

Zur Berechnung der Nutzenergie sollen wieder zwei Verfahren gegenübergestellt werden.

1.) Das bisher entwickelte Berechnungsmodell (Kap. 6.2)

$$Q_{\text{MOD}} = A \int_{t_1}^{t_2} ((0.905 \delta + (1 - \delta) K_{\theta}) \eta_{\text{ODIR}} \dot{G} - U_L (T_F - T_L)) dt$$

$$\text{mit } U_L = U_L ((T_F - T_L), V_W)$$

2.) Die durch die BSE-Prozedur ermittelte Wirkungsgradkennlinie für

$$V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} / 14/$$

$$Q_{\text{BSE}} = A \int_{t_1}^{t_2} \eta_{\text{BSE}} \dot{G} dt$$

$$\text{mit } \eta_{\text{BSE}} = \eta_{\text{BSE}} (T^*, V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

$$T^* = \frac{T_F - T_L}{\dot{G}}$$

Die BSE-Wirkungsgradkennlinie für $V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ lag zur Auswertung als Näherungspolynom 2. Grades vor.

Die gemessene Nutzenergie wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$Q_{\text{MESS}} = \dot{m} c_F \int_{t_1}^{t_2} (T_a - T_e) dt$$

Untersucht wurde der 5.9.79 von 9⁰⁰ - 15⁰⁰ MEZ. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 6.3.3 und 6.3.4 sowie in Tabelle 6.6 dargestellt.

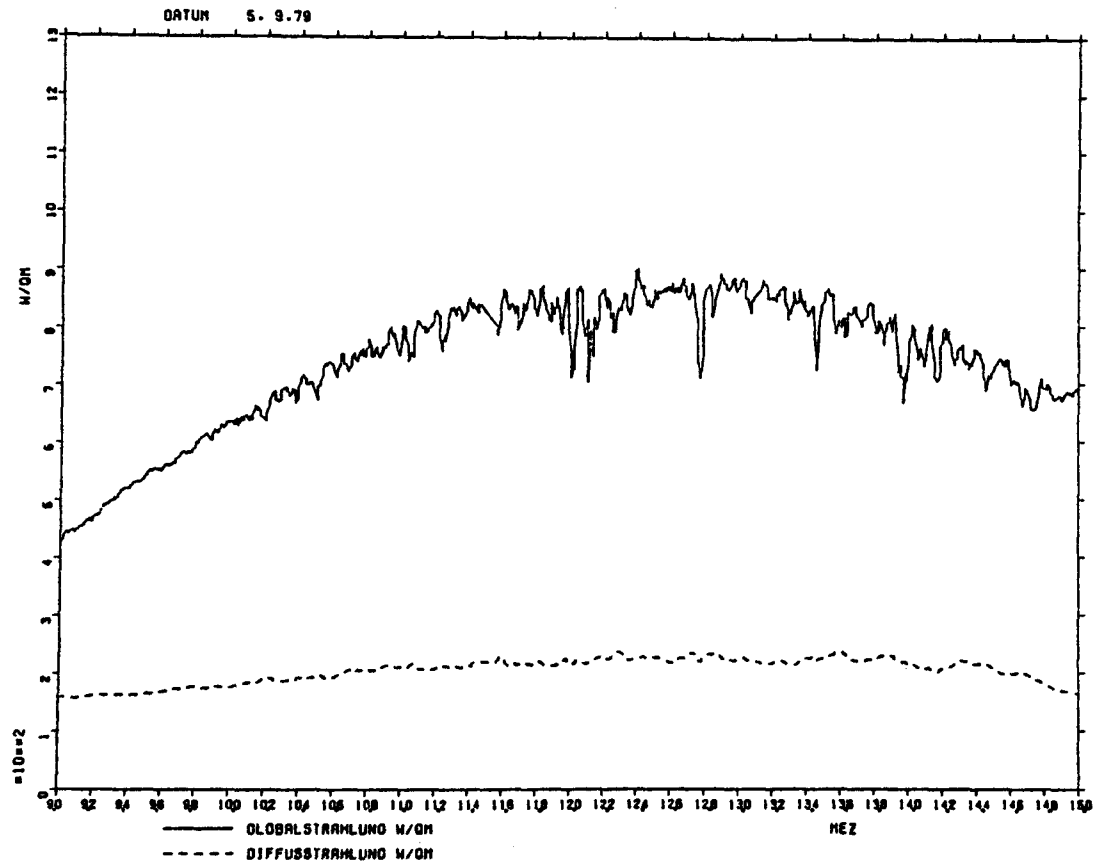


Abb. 6.3.3: Einstrahlungsprofil des 5.9.79 von 9⁰⁰ - 15⁰⁰ MEZ

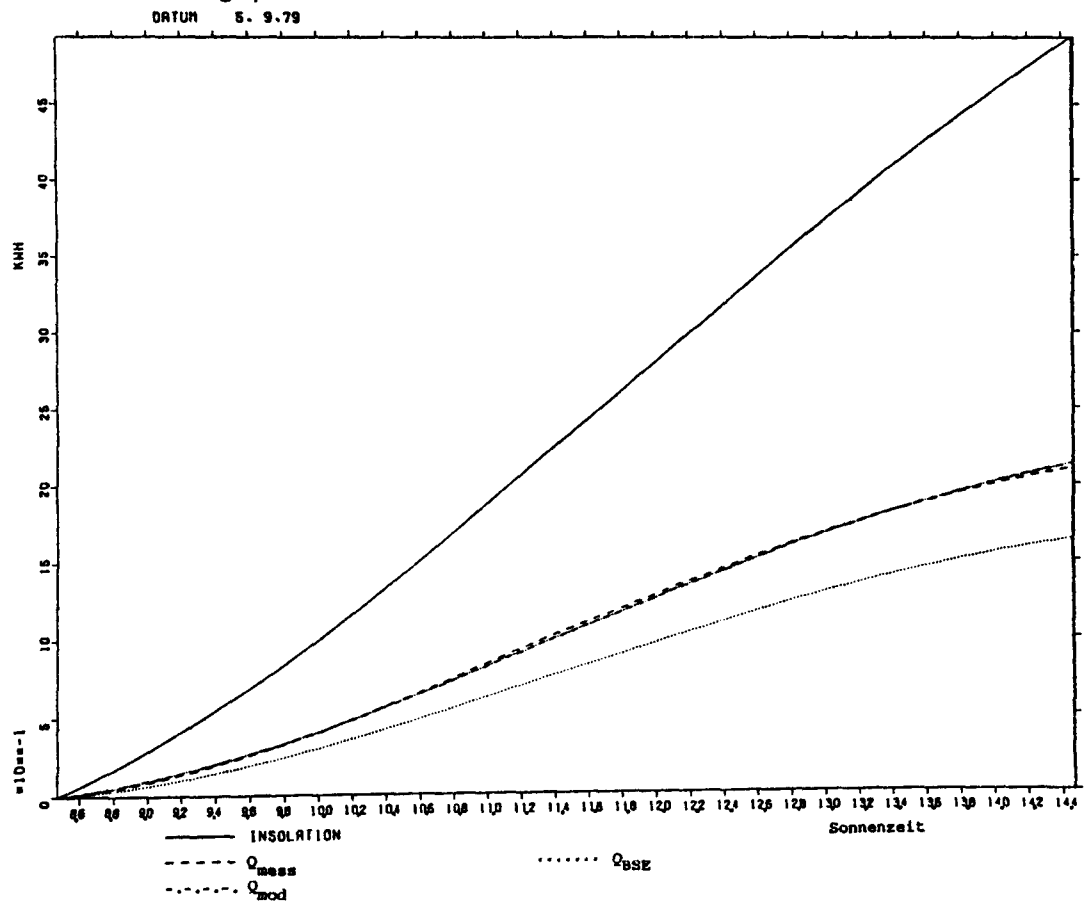


Abb. 6.3.4: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Nutzenergie

Tabelle 6.6

Datum	5.9.79
Integrationszeit t_1, t_2 MEZ	9 ⁰⁰ - 15 ⁰⁰
Gemessene Nutzenergie Q_{MESS} kWh	2.107 ± 0.055
Berechnete Nutzenergie Modell Q_{MOD} kWh	2.14
BSE Q_{BSE} kWh	1.64
$\left \frac{Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{MOD}}}{Q_{\text{MESS}}} \right \cdot 100\%$ %	1.4
$\left \frac{Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{BSE}}}{Q_{\text{MESS}}} \right \cdot 100\%$ %	22.0

Die Verwendung der Wirkungsgrad-Kennlinie für $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ führt zu einer erheblichen Unterschätzung der Nutzenergie um 22%.

Das BSE-Verfahren stellt als Berechnungsgrundlage neben der $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Kennlinie nur noch die für $V_W = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zur Verfügung. Eine Verwendung der Wirkungsgradkennlinie ergab für den o.g. Messabschnitt eine Überschätzung der Nutzenergie um 9% bei einer gemessenen Windgeschwindigkeit von $1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Hieran zeigt sich, daß die Verwendung von nur einer der beiden Kennlinien zu beachtlichen Fehlern führen kann.

3.3.3 Kollektorverhalten bei wechselnder Einstrahlung mit erhöhten Verlauftemperaturen

An Tagen mit fluktuierender Einstrahlung kommt es häufig vor, daß die Einstrahlung unter eine minimale Einstrahlung fällt, die gerade noch in der Lage wäre, die thermischen Verluste zu decken.

$$\eta = \eta_0 - U_L \frac{(T_a - T_e)}{\dot{G}_{\min}} = 0$$

$$\dot{G}_{\min} = \frac{U_L}{\eta_0} (T_a - T_e)$$

Für $G > \dot{G}_{\min}$ gilt $(T_a - T_e) < 0$
 $\eta < 0$

Derartige Betriebspunkte sind unerwünscht und praktisch so zu vermeiden, daß während dieser Zeiten kein Fluid durch den Kollektor gefördert wird. Erst wenn $(T_a - T_e) > 0$ setzt der Pumpvorgang wieder ein.

Die Nutzenergie der Tage mit wechselnder Einstrahlung wurde nur für die Perioden bestimmt, die einen positiven Beitrag zur Nutzenergie lieferten. Diese Vorgehensweise wurde nicht durch den Versuchsaufbau verwirklicht, sondern im Auswertungsprogramm, indem nur die Zeitabschnitte addiert wurden für die $(T_a - T_e) > 0$.

Dabei muß man sich klarmachen, daß bei der gerätetechnischen Verwirklichung die Wärmekapazitäten der Kollektormaterialien und des Fluids ein späteres Einsetzen der Pumpe bewirken würde, weil nach der Unterkühlung durch einen Strahlungseinbruch erst wieder das ursprüngliche Temperaturniveau durch Insolation erreicht werden muß.

Der Unterschied zwischen gerätetechnischer Verwirklichung und Auswertungsmodell wird umso größer sein, je häufiger und tiefer die Einstrahlung unter die Minimaleinstrahlung sinkt. Es ist sogar denkbar, daß der Kollektor bei bestimmten extremen Einstrahlungsprofilen gar keine Nutzenergie mehr liefert, während das Auswertungsmodell noch positive Beiträge erwarten läßt.

Im folgenden wird nur der ideal geregelte Kollektor behandelt, bei dem die Wärmekapazitätseffekte vernachlässigt werden.

Untersucht wurden zwei Meßperioden verschiedener Tage, wobei die aus den Messungen bestimmte Nutzenergie mit zwei rechnerisch ermittelten verglichen werden soll (Kap. 6.3.2).

Methode 1

Die Nutzenergie wird mit dem bisher abgeleiteten Modell bestimmt.

$$Q_{\text{MOD}} = A \int_{t_1}^{t_2} ((0.905 \delta + (1 - \delta)) K_{\theta}) \eta_{\text{ODIR}} \dot{G} - U_L (T_F - T_L) dt$$

worin $U_L = U_L((T_F - T_L), V_W)$

Methode 2

Der Wirkungsgrad wird mit der im Test ermittelten Kennlinie für $V_W = 5 \frac{m}{s}$ ermittelt.

$$Q_{\text{BSE}} = A \int_{t_1}^{t_2} \eta_{\text{BSE}} \dot{G} dt$$

mit

$$\eta_{\text{BSE}} = \eta_{\text{BSE}} (T^*, V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

$$T^* = \frac{T_F - T_L}{\bar{G}}$$

Die aus den Meßdaten ermittelte Nutzenergie wird durch die Gleichung

$$Q_{\text{MESS}} = \dot{m} c_F \int_{t_1}^{t_2} (T_a - T_e) dt$$

bestimmt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.7 zusammengefaßt. Für den 2.11.79 sind Einstrahlungsprofil, Integrationsverlauf der Insolation und Nutzenergie in Abbildung 6.3.5 und 6.3.6 dargestellt.

Datum		2.11.79	7.11.79
Uhrzeit	MEZ	10 ³⁶ - 14 ³⁶	11 ⁰⁰ - 13 ⁰⁰
\bar{G}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	559.	644.
$T_F - T_L$	$^{\circ}\text{K}$	47.4	50.9
T^*	$\frac{^{\circ}\text{K m}^2}{\text{W}}$	0.0847	0.079
$\bar{\delta}$		0.36	0.22
V_W	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	3.3	3.9
Q_{MESS}	kWh	0.416 ± 0.025	0.179 ± 0.011
Q_{MOD}	kWh	0.407	0.201
Q_{BSE}	kWh	0.279	0.154

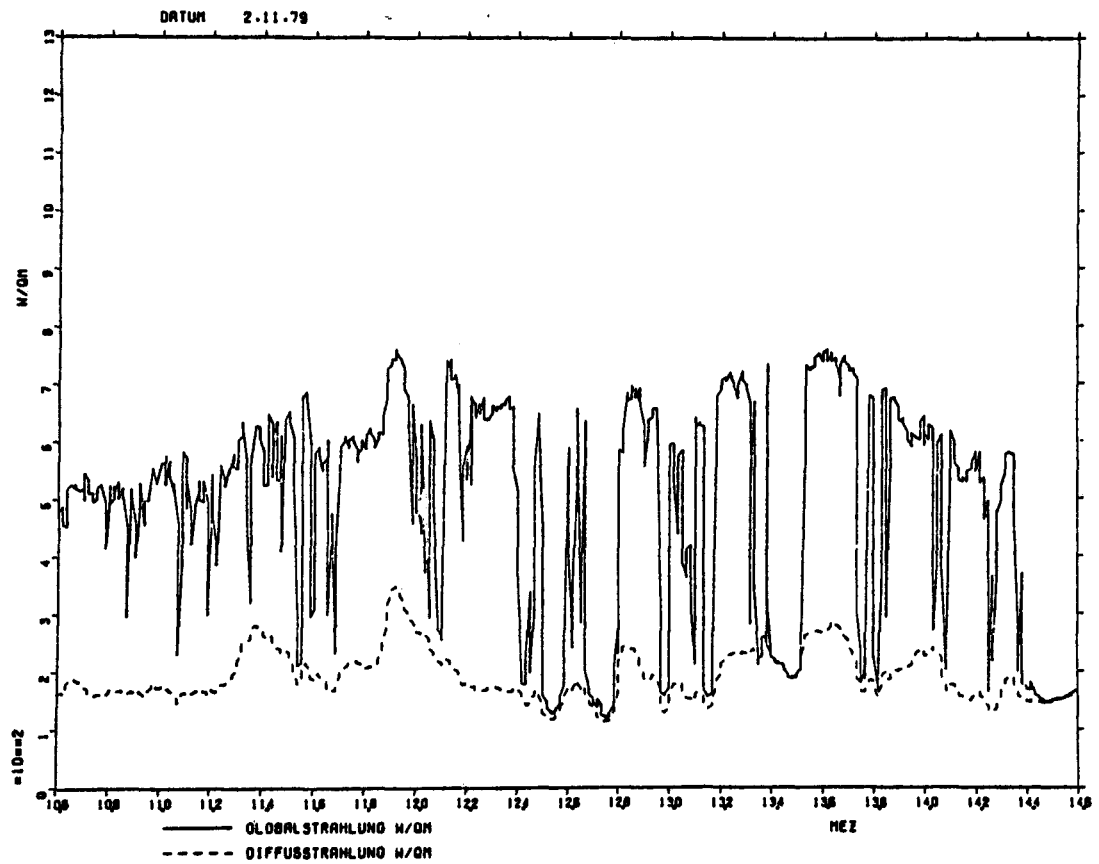


Abb. 6.3.5: Einstrahlungsprofil des 2.11.79 von 10^{36} - 14^{36} MEZ

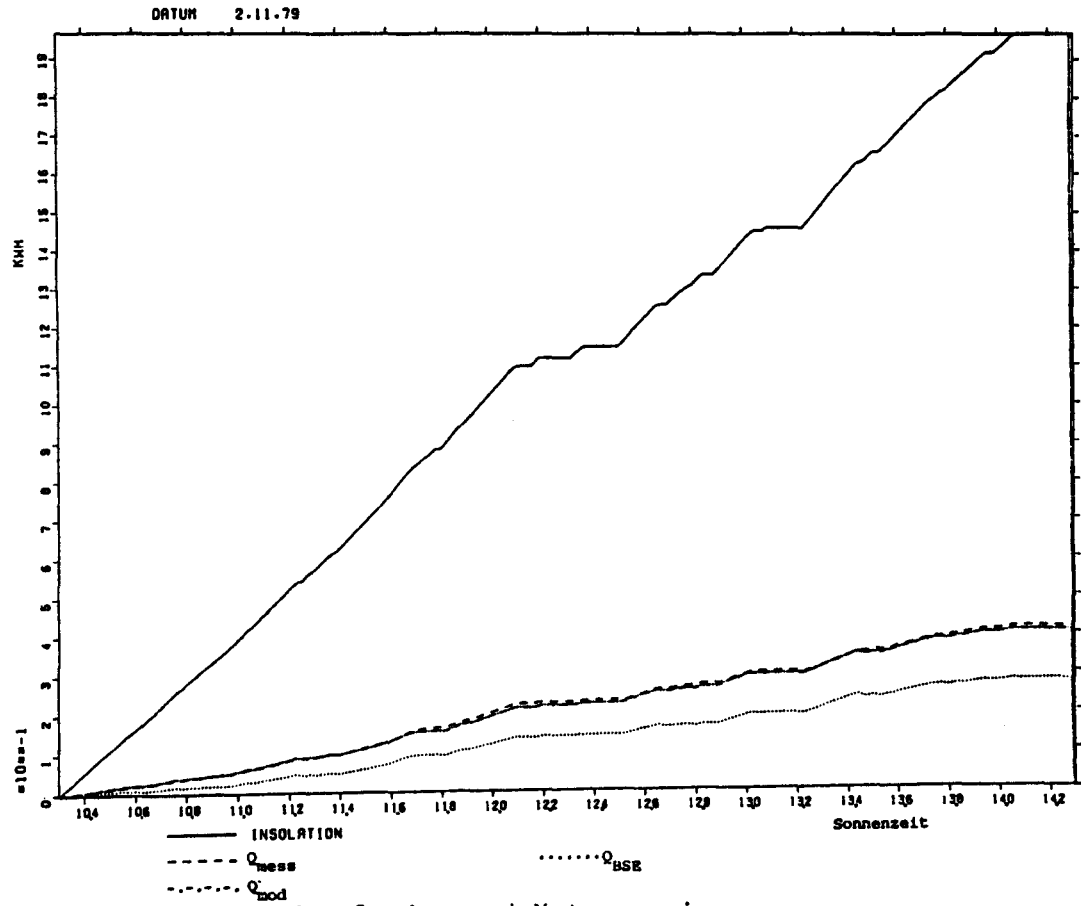


Abb. 6.3.6: Integration von Insolation und Nutzenergie

Das Ergebnis der Methode 1 zeigt erwartungsgemäß größere Abweichungen um die Meßwerte als bei den stationären Einstrahlungen. Hier gelten jedoch die Erklärungen des Kap. 6.3.2 für die Unsicherheiten im verstärkten Maße, so daß auch für die Meßperioden mit fluktuierender Strahlung die theoretischen Kennlinien bestätigt werden.

Die Auswertung für jeweils zwei Meßtage stabiler und fluktuierender Einstrahlung ergaben für die Abweichung der Stundenwerte beider Berechnungsmodelle vom Meßwert folgendes Bild:

Stabiles Einstrahlungsprofil

$$\eta_{\text{MESS}} - \eta_{\text{MOD}} = - 0.1\% \quad \pm 2.1\%$$

$$Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{MOD}} = - 0.23\% \quad \pm 4.8\%$$

$$\eta_{\text{MESS}} - \eta_{\text{BSE}} = 5.9\% \quad \pm 2\%$$

$$Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{BSE}} = 13.5\% \quad \pm 4.6\%$$

fluktuierendes Einstrahlungsprofil

$$\eta_{\text{MESS}} - \eta_{\text{MOD}} = - 0.1\% \quad \pm 1.5\%$$

$$Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{MOD}} = - 0.4\% \quad \pm 6.6\%$$

$$\eta_{\text{MESS}} - \eta_{\text{BSE}} = 5.3\% \quad \pm 1.4\%$$

$$Q_{\text{MESS}} - Q_{\text{BSE}} = 26.5\% \quad \pm 12. \%$$

Die Abweichungen der Nutzenergie sind für diffuse Einstrahlung größer als bei stabiler, was auf das niedrigere Wirkungsgradniveau und die Spreizung des Wirkungsgradkennlinienfeldes bezüglich des Windeinflusses zurückzuführen ist. Die BSE-Prozedur liefert die Wirkungsgradkennlinien für $V_W = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wobei die Kennlinie für $V_W = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ praktisch nur Laborbedeutung hat.

Die Verwendung der BSE-Wirkungsgradkennlinie für $V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ als Berechnungsgrundlage zur Bestimmung von Tages- oder Stundenwerten stützt sich auf die Kenntnis des Windeinflusses auf den Kollektorstufenwirkungsgrad, der mit zunehmender Windgeschwindigkeit einem Grenzwert zustrebt. Daher ist die Verwendung der Kennlinie mit $V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sinnvoller als der Einsatz der Kennlinie

für $V_W = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Abb. 6.3.2). Erwartungsgemäß unterschätzt die Anwendung der Kennlinie für $V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Nutzenergie und Wirkungsgrad für die berechneten Meßintervalle, dessen mittlere Windgeschwindigkeit bei etwa $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ lag. Die Anwendung der Kennlinie von $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zeigt ebenfalls Abweichungen der gleichen Größenordnung.

Zur genaueren Berechnung ist entweder eine feinere Abstufung des Kennlinienfeldes bezüglich der Windgeschwindigkeit von der BSE-Prozedur zu fordern oder ein geeignetes Verfahren zur Interpolation der Kennlinienwerte für verschiedene Windgeschwindigkeiten notwendig.

6.4 Einfluß von Integrationsdauer und Mittelwertbildung auf die Bestimmung des Wirkungsgrades

Schon in Kap. 6.2.1 und 6.2.2 wurde für 30-min-Werte und 15-min-Werte gezeigt, daß ein Übergang zu kürzeren Integrationszeiten Streuungen um den Stundenwert verursacht, die bei fluktuierender Strahlung erheblich waren. Die Kenntnis typischer Streuungen vereinfacht die Abschätzung der notwendigen Meßintervalldauer um innerhalb einer vorgegebenen Fehlergrenze zu bleiben.

Bei Berechnung von Wirkungsgrad oder Nutzenergie unter Verwendung von Mittelwerten gibt es zwei verschiedene Ursachen der Streuung.

1.) Streuungen durch Wahl der Meßperiode

Hierbei handelt es sich um statistische Abweichungen die durch transienten Verlauf meteorologischer Größen verursacht werden. Bei dieser Art der Streuung ist zu erwarten, daß die Abweichungen bei Stichproben geringen Umfangs, also kurzen Integrations- oder Mittlungszeiten, zunehmen. Diese Erwartung ist schon in Kap. 6.2.1 und 6.2.2 bestätigt worden.

2.) Streuungen durch Mittelwertbildungen

Meteorologische Daten liegen in den wenigsten Fällen als zeitlich hochaufgelöste Momentanwerte vor, sondern als Mittelwerte bestimmter Zeitintervalle. Während eines Zeitintervalls kann der Kollektor mehrere Betriebspunkte im Wirkungsgradkennlinienfeld durchlaufen. Da das Kennlinienfeld bezüglich der Windgeschwindigkeit V_W und der Einstrahlung \dot{G} einen nichtlinearen Charakter hat, sind Abweichungen durch Mittelwertbildung unvermeidbar. Aufgrund dieser Überlegungen ist anzunehmen, daß die auftretenden Differenzen um so größer sind, je größer die Streuung der Betriebspunkte um den Mittelwert ist. Dabei kann die Streuung der Betriebspunkte wieder zwei Ursachen haben:

- a) große Meßintervalle (Tagesmittelwerte)
- b) fluktuierende Einstrahlungen

Die Bearbeitung dieses Themas erfolgt in zwei Schritten

Kap. 6.4.1 Vergleich von Stundenmittelwerten mit Tagesmittelwerten für jeweils einen "klaren Tag" und einen Tag mit fluktuierender Einstrahlung

Kap. 6.4.2 Vergleich von Stundenmittelwerten mit 30 min-, 20 min-, 10 min-Mittelwerten

6.4.1 Vergleich berechneter Nutzenergien unter Verwendung von Stundenmittelwerten und Tagesmittelwerten

Die Streuwirkung soll für beide im letzten Kapitel vorgestellten Berechnungsmethoden bestimmt werden.

Das Datenmaterial besteht aus Momentanmessungen mit einer Zeitauflösung von 25 s.

Die Auswertung erfolgt mit folgenden Gleichungen:

1.) Gemessene Nutzenergie

$$Q_{\text{MESS}} = \dot{m} c_F \int_{t_1}^{t_2} (T_a - T_e) dt \quad \text{für } (t_2 - t_1) = \text{Stundenwerte, Tageswert}$$

2.) Berechneter Mittelwert des entwickelten Modells

$$\bar{Q}_{\text{MOD}} = A \bar{\dot{G}} ((0.905 \bar{\delta} + (1-\bar{\delta}) K_{\theta}) \eta_{\text{ODIR}} - U_L (T_F - T_L)) \quad \text{für Stundenwerte und Tageswert}$$

$$\text{mit } \bar{\delta} = \frac{\bar{\dot{G}}_{\text{DIF}}}{\bar{\dot{G}}}$$

$$T_F = \frac{T_a + T_e}{2}$$

$$U_L = U_L ((T_F - T_L), V_W)$$

3.) Berechneter Mittelwert aus der BSE-Wirkungsgradkennlinie

$$\bar{Q}_{\text{BSE}} = A \bar{\dot{G}} \bar{\eta}_{\text{BSE}}$$

$$\text{mit } \bar{\eta}_{\text{BSE}} = \eta_{\text{BSE}} (T^*, V_W = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

$$T^* = \frac{T_F - T_L}{\bar{\dot{G}}}$$

$$T_F = \frac{T_a + T_e}{2}$$

Die Berechnungen erfolgten für den 5.9.79 und den 2.11.79. Die Einstrahlungsprofile dieser Tage sind für die angegebenen Meßzeiten in Kap. 6.3.2 und 6.3.3 dargestellt.

Tabelle 6.8 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen

Datum		5.9.79		2.11.79	
Zeitintervall	MEZ	9 ⁰⁰ - 15 ⁰⁰		10 ⁵⁶ - 14 ⁵⁶	
Strahlungsprofil		stabil (Tagesgang)		fluktuierend	
Gemessene Nutzenergie	kWh	2.107 ± 0.055		0.416 ± 0.025	
Berechnungsmethode		Modell	BSE	Modell	BSE
Nutzenergie					
Tagesmittelwert	kWh	2.114	1.81	0.395	0.316
Prozentuale Differenz zum Meßwert	%	0.4	13.9	5.0	24.2
Nutzenergie					
Σ Stundenmittelwerte	kWh	2.110	1.817	0.409	0.319
Prozentuale Differenz zum Meßwert	%	0.1	13.7	1.6	23.4
Verbesserung des Σ Stundenwertes gegenüber dem Tageswert	%	0.3	0.2	3.4	0.8

Damit liegen die Abweichungen der Modellwerte alle innerhalb der Fehlergrenze der gemessenen Nutzenergie, während die Abweichungen der BSE-Modellrechnung signifikant sind.

Das Ergebnis bestätigt die Erwartungen aus Kap. 6.4:

- Die Annäherung der berechneten Nutzenergie an die gemessene ist durch Stundenmittelwerte besser als durch Tagesmittelwerte.
- Die Annäherung ist bei fluktuierender Strahlung deutlicher als bei stabilem Einstrahlungsverlauf.

Auffällig ist, daß die Tagesmittelwerte bereits gute Näherungen ergeben. Die Verbesserung der Stundenwerte gegenüber dem Tagesmittelwert fällt bei der BSE-Modellrechnung weniger deutlich aus als bei dem entwickelten Modell. Dies Ergebnis läßt sich dadurch erklären, daß das BSE-Modell nur eine Veränderung des Betriebspunktes auf der zur Rechnung herangezogenen Kennlinie berücksichtigt und den Windeinfluß als konstante Größe in das Ergebnis mit einbezieht.

6.4.2 Vergleich von Stundenmittelwerten mit Zeitintervallen kürzerer Mitteldauer

Die Streuwirkung der beiden Berechnungsmethoden soll in diesem Kapitel für kurze Zeitintervalle untersucht werden.

Die verwendeten Gleichungen und Mittlungsvereinbarungen sind die gleichen wie im letzten Kapitel.

Die Abweichung des Wirkungsgrades der einzelnen Zeitintervalle mit der Dauer Δt werden durch die Vorschrift

$$\Delta \eta_{\Delta t} = \eta_{\text{MESS}}_{\Delta t} - \eta_{\Delta t}$$

gebildet.

Dem Stundenwert $\Delta \eta_{60}$ sind also

zwei 30-min-Werte $\Delta \eta_{30,1}, \Delta \eta_{30,2}$

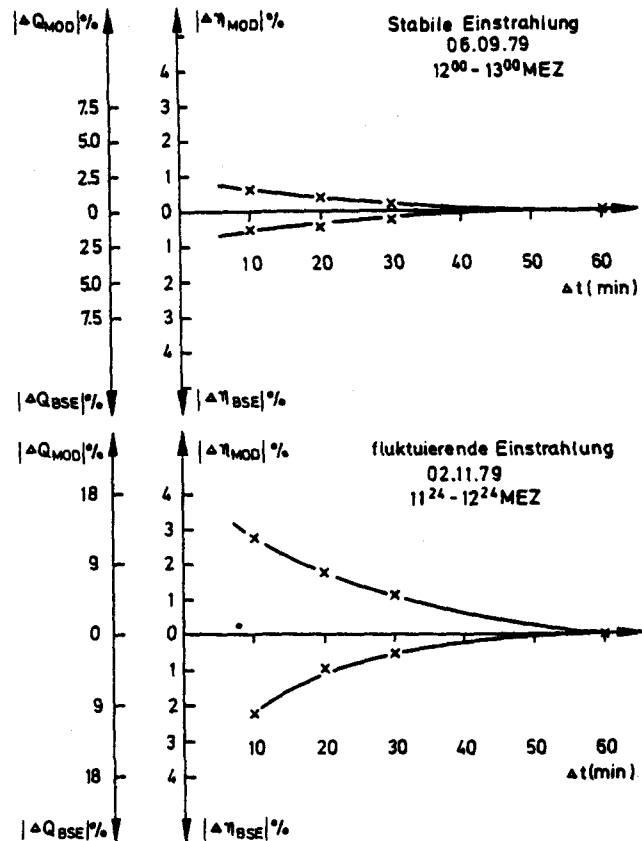
drei 20-min-Werte $\Delta \eta_{20,1}, \Delta \eta_{20,2}, \Delta \eta_{20,3}$

sechs 10-min-Werte $\Delta \eta_{10,1} \dots \Delta \eta_{10,6}$

mit deren Standardabweichungen $S\Delta \eta_{30}$, $S\Delta \eta_{20}$ und $S\Delta \eta_{10}$ zugeordnet.

Entsprechend wird für die Abweichungen der Nutzenergie verfahren. Die Standardabweichungen sind das Maß für die Streuung der Kurzzeitintervalle um den Stundenwert.

Abb. 6.4.1:
Typische Streuungen kurzer Meß-
intervalle um den Stundenwert



In Abbildung 6.4.1 ist das typische Streuverhalten für verschiedene Einstrahlungsverhältnisse auf der Basis von Stundenwerten beispielhaft gegenübergestellt, wobei für Stundenwerte selbst mit einer Streuung des Wirkungsgrades von 2% ungeachtet des verwendeten Modells oder des Einstrahlungsprofils gerechnet werden muß (Kap. 6.3.4).

Beide Berechnungsmethoden zeigen ähnliche Streuwirkungen, die bei fluktuierender Einstrahlung deutlich über denen bei stabiler Einstrahlung liegen. Auch hier macht sich, durch niedrige Wirkungsgrade bei fluktuierender Einstrahlung ein starker Einfluß auf die Abweichungen der Nutzenergie bemerkbar.

Wirkungsgradbestimmungen von Kollektoren sind prinzipiell auch bei fluktuierender Einstrahlung möglich, wenn die Streuwirkung durch Meßintervalle längerer Dauer herabgesetzt wird. Die minimale Meßdauer hängt von der geforderten Genauigkeit der Messung ab.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Abel, K., Zwick, A., 1978. Wärmegewinnung durch Sonnenenergie
Solarenergie-Technik GmbH, Düsseldorf
- /2/ Beckmann, W.A., Duffie, J.H., 1976, Sonnenenergie Thermische Prozesse, Udo Pfriemer Verlag GmbH, München
- /3/ Brandenburg, G., Hallig, H., Lech, G., Ringel, H., 1977, Realtime Basic für MACAMAC (INTEL 8080). Interner Bericht der KFA Jülich, ZEL - 500277
- /4/ BSE, 1978. Usability of solar collectors. A solar collector efficiency test.
Bundesverband Solarenergie
- /5/ Dehne, K., 1979, About technique of measuring the global radiation, direct solar or beam radiation and diffuse sky-radiation, Metereologisches Observatorium Hamburg
- /6/ Dunkle, R.V., Cooper, P.I., A proposed method for the evaluation of performance parameters of flat-plate solar collectors
- /7/ Grüter, J.W. Kruck, K.P., Labus, H., 1978, MADAS a microprocessor aided data aquisition system. Jül-Spez-15, ISSN 0343-7639, 131
- /8/ Grallert, H., 1977, Solarthermische Heizungssysteme, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien
- /9/ Hill, J.E., Kusuda, T., 1977, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, ASHRAE STANDARD 93 - 77, Ashrae 345, East 47th Street, New York 10017
- /10/ Maßmeyer, K., 1979, Einflüsse metereologischer Parameter auf die Stillstandtemperatur von thermischen Flachkollektoren, Diplomarbeit am Institut für Geophysik und Metereologie der Universität zu Köln
- /11/ Mahr, A.J., Dahlberg, D.A., Dirmhirn, J., 1978, Experiences with tests and calibrations of pyranometers for mesoscale solar-irradiance, Network, Solar Energy 22, 3, 1979, 197 - 203
- /12/ NBS, 1978, Results and analysis of a Round-Rabin Test Program for Liquid-Heated Flat-Plate Solar Collectors

- /13/ Pohl, P., 1978, Messungen des Wirkungsgrades von thermischen Flachkollektoren, Ing.-Arbeit an der FHS Aachen, Abt. Jülich, Fachbereich Physikalische Technik
- /14/ Schroer, R., Private Mitteilung
- /15/ Topografische Karte 1:250000, Normalausgabe mit Waldflächen, 5004 Jülich, Landesvermessungsamt NRW, 12. Auflage 1977

BILDTEIL

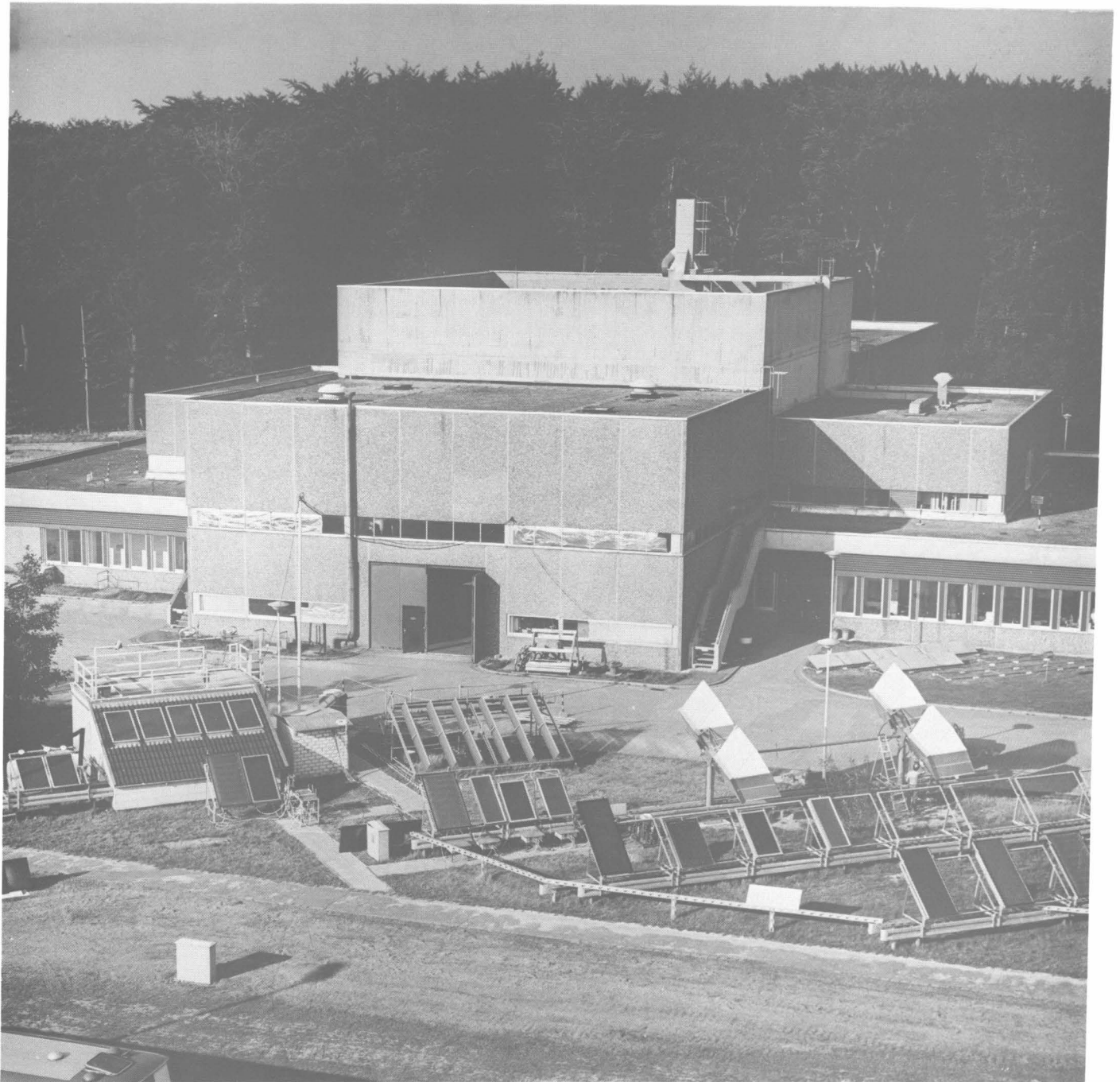


Bild 1

1 Teststand



Bild 2

- 1 Leerlaufkollektor
- 2 Kreislaufkollektor
- 3 Infrarot Strahlungsmeßgerät
- 4 Haus mit zentraler Datenerfassung
- 5 Diffusstrahlungspyranometer
- 6 Globalstrahlungspyranometer



Bild 3

- 1 Anemometer
- 2 Ventiliertes Ansaugrohr zur Messung der Umgebungstemperatur



Bild 4

- 1 1000 l Flüssigkeitstank
- 2 30 l Vorwärm tank
- 3 Globalstrahlungs pyranometer
- 4 Meßstelle der Kollektorauslaßtemperatur

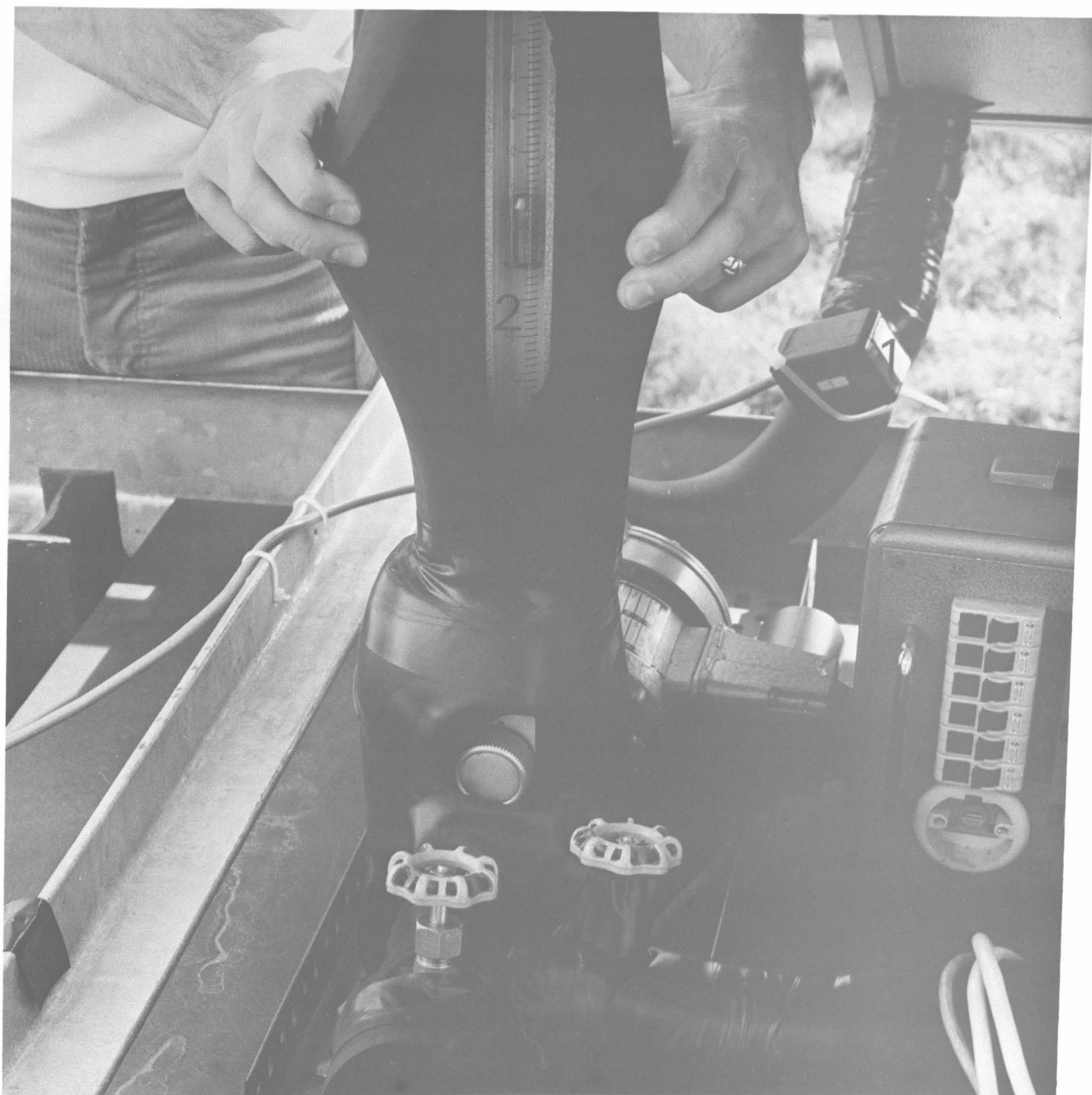


Bild 5

- 1 Temperaturmeßstelle der Kollektoreinlaßtemperatur
- 2 Schwebekörperdurchflußmesser